



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**MODELAGEM E ANÁLISE DE DISPOSITIVOS DE
PROTEÇÃO CONTRA SURTOS NO ALTERNATIVE
TRANSIENT PROGRAM - ATP**

**Autor: Marcelo Alves da Silva Júnior
Orientador: Alex Reis**

**Brasília, DF
2019**



MARCELO ALVES DA SILVA JÚNIOR

**MODELAGEM E ANÁLISE DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONTRA
SURTOS NO ALTERNATIVE TRANSIENT PROGRAM - ATP**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

**Brasília, DF
2019**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação

da Silva Júnior, Marcelo Alves.

Modelagem e Análise de Dispositivos de Proteção
Contra Surtos no Alternative Transient Program – ATP/
Marcelo Alves da Silva Júnior. Brasília: UnB/FGA, 2019.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2019. Orientação: Alex Reis

1. Descargas Atmosféricas. 2. Parâmetros Elétricos do Surto. 3.
Modelagem ATP. 4. Simulações e Resultados. 5. Definições
Práticas De Vida Útil. 6. Metodologia e Resultados dos Ensaios.
7. Predição de Desgastes e Avaliação de Vida Útil.

CDU Classificação



MODELAGEM E ANÁLISE DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS NO ALTERNATIVE TRANSIENT PROGRAM - ATP

Marcelo Alves da Silva Júnior

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em (data da aprovação dd/mm/aa) apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr.: Alex Reis, UnB/ FGA
Orientador

Prof. (Titulação): Nome do Professor, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof. (Titulação): Nome do Professor, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2019

*A Jesus Cristo, o caminho, a
verdade e a vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir chegar onde eu nunca pensei que conseguiria e à minha família pelo apoio durante toda a graduação, em especial a minha mãe Isabel e meus avós João e Maria, que sempre estiveram presentes nos momentos difíceis e são minha referência, auxílio e maior inspiração.

Agradeço também aos amigos que de alguma forma contribuíram para execução desse trabalho, em especial ao Cesar Júnior, pelos tantos anos de amizade, motivações e empenho em ajudar nas muitas revisões e dúvidas referentes ao trabalho. Por fim agradeço ao meu orientador Alex Reis pela disposição, paciência e dedicação em ajudar e tirar dúvidas.

RESUMO

Descargas atmosféricas são fenômenos físicos comuns a todas as regiões da Terra. A sua aparição advém de um intenso campo elétrico que se forma entre a nuvem de origem e o solo, de forma que a propagação deste caracteriza a formação de um caminho elétrico que se estende até o solo, provocando uma intensa interferência eletromagnética nas regiões próximas à área de impacto. Essa interferência é caracterizada como surto de energia elétrica, e é propício desse surto a manifestação de sobretensões, que podem causar mal funcionamento dos equipamentos ou mesmo a queima desses, o que por muitas vezes, pode acarretar na interrupção de uma atividade comercial importante, além de inúmeros prejuízos financeiros possíveis. Pensando nisso, uma série de dispositivos de chaveamento tem sido desenvolvidos na atualidade com a finalidade de proteger o sistema contra surtos na rede elétrica e estes são chamados DPS (Dispositivos de Proteção contra Surtos Elétricos). Dito isto, este trabalho visa caracterizar tal dispositivo, através de sua modelagem e análise em ambiente ATP (Alternative Transient Program).

Palavras-chave: DPS, Dispositivo de proteção, surto elétrico, descarga atmosférica, desgaste, degradação, ATP.

ABSTRACT

Atmospheric discharges are physical phenomena common to every place on earth. The occasion of its insurgence gives rise an intense electric field that is formed between the cloud and the ground, as way that its spread characterizes the formation of an electric way that extends itself across the air down to the roof, what provides an intense electromagnetic interference near the area of the impact. This interference is called electric outbreak, and its proper from this outbreak express the manifestation of overvoltages, that can cause malfunction of the electronic devices or even its burn, what many times, may interrupt an important commercial activity, besides the numerous financial damages in addition. Based on it, several switch devices are been developed nowadays with the purpose of protect the system against electric outbreaks and it's called outbreaks protection devices. That being said, this work aims characterize this device, validate and analyze its modeling by using ATP (Alternative Transient Program) simulations.

Keywords: Protection device, CLAMPER, electrical outbreak, atmospheric discharge, fret, degradation, ATP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mapa ceráunico mundial (número de dias de trovoadas por ano).....	17
Figura 2.2 - Conexão do BEP com o DPS. Fonte: Adaptada de IEEE.....	19
Figura 2.3 - Esquema de instalação do DPS na rede	20
Figura 2.4 - Centelhadores a Gás.....	21
Figura 2.5 -Diodos Supressores.....	22
Figura 2.6 - Modelo Varistor.....	22
Figura 2.7 - Curva do Varistor.....	23
Figura 2.8 – Micrografia pó varistor	24
Figura 2.9 - Esquema representativo do varistor segundo sua disposição granular	25
Figura 5.1 - Interface de desenvolvimento do circuito elétrico ATP Draw	41
Figura 5.2 - Janela de plotagem do ATP	42
Figura 5.3 – Representação do modelo MOV Type 92 no ATP	43
Figura 5.4 – Varistor representado no convencional	43
Figura 5.5 - Varistor representado no modelo Tominga Et. Al.	44
Figura 5.6 - Varistor representado no modelo Kim Et. Al.	44
Figura 5.7 - Varistor representado no modelo IEEE.	45
Figura 5.8 - Modelo desenvolvido para representação do DPS	45
Figura 3.1 - Curva característica do varistor de para-raios ZnO	61
Figura 4.1 - Modelos de DPS CLAMPER utilizados no ensaio de baixa tensão	66
Figura 4.2 - Curva característica do varistor (Comparativo de modelos)	71
Figura 4.3 - Gráfico comparativo dos modelos B e C em relação ao modelo novo A.....	72
Figura 4.4 - Gráfico comparativo de curvas do varistor dos modelos D e E.....	73
Figura 4.5 - Gráfico comparativo de curvas do varistor dos modelos F e G.....	73
Figura 4.6 - Gráfico comparativo de curvas do varistor do modelo H.....	74
Figura 4.7 - Gráfico comparativo de curvas do varistor dos modelos I e J.....	74
Figura 4.8 - Gráfico comparativo de curvas do varistor dos modelos K1 e K2	75
Figura 4.11 - Proposta básica da análise de regressão linear.....	76
Figura 4.12 - Gráfico de obtenção das linhas de tendência equacionadas	77
Figura 4.13 - Gráfico comparativo de curvas do varistor dos modelos L e M.....	78
Figura 6.1 - Gráfico $V \times I$ do varistor impresso pelo Alternative Transient Program.....	79
Figura 6.2 - Modelo de simulação do DPS classe II utilizado	80
Figura 6.3 - Gráficos de tensões para 10kA	81

Figura 6.4 - Gráficos de corrente para 10kA	81
Figura 6.5 - Gráfico de potência para 10kA	82
Figura 6.6 - Gráficos de tensão para 20kA	82
Figura 6.7 - Gráficos de corrente para 20kA	83
Figura 6.8 - Gráficos de potência para 20kA.....	83
Figura 6.9 - Gráficos de tensão para 40kA	78
Figura 6.10 - Gráficos de corrente para 40kA	79
Figura 6.11 - Gráficos de potência para 40kA.....	80
Figura 6.12 - Gráficos de energia no varistor sob a atuação a 10 e 20kA.....	81
Figura 6.13 - Gráfico de energia para 40kA no varistor sob a atuação	81

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
ATP	Alternative Transient Program
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Reguladora
BEP	Barramento de Equipotencialização Principal
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Energética
MOV	Metal Oxide Varistor
TVA	Type Varistor for Lightning Protection
ZnO	Óxido de Zinco

LISTA DE SÍMBOLOS

K_c	Fator de proteção da esfera de proteção
I_0	Corrente de pico
$R_{ATRA\zeta}$	Raio da esfera de proteção
α	Coefficiente de não linearidade do varistor
$J1$	Densidade de corrente inicial
$J2$	Densidade de corrente final
i	Corrente em um condutor
L_0	Indutância de campo
Up	Tensão de proteção
Z_c	Impedância característica da linha de transmissão
$E1$	Campo elétrico na entrada
$E2$	Campo elétrico na saída
D	Difusão total do material
$D0$	Difusividade do material
Q	Energia de ativação
R	Constante dos gases
T	Temperatura na superfície
Kb	Constante de Boltzmann
r_{xy}	Constante de correlação

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
SUMÁRIO	xii
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	14
1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	15
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SPDA).....	17
2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	17
2.1.1 ATERRAMENTO.....	18
2.2 DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS ELÉTRICOS (DPS)	19
2.2.1 COMPONENTES ATUADORES	20
3 DEFINIÇÕES PRÁTICAS DE VIDA ÚTIL SOBRE A CURVA DO VARISTOR	26
3.1 DETERMINAÇÃO DAS REGIÕES DA CURVA	26
3.1.1 REGIÃO DE BAIXA CORRENTE	26
3.1.2 REGIÃO INTERMEDIÁRIA DE ALTA NÃO-LINEARIDADE	28
3.1.3 REGIÃO DE ALTA CORRENTE	28
4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	29
4.1 CARACTERÍSTICA DOS MODELOS DE DPS UTILIZADOS	29
4.2 O ENSAIO DE BAIXA TENSÃO	31
4.3 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES	32
4.3.1 AMOSTRAGEM DOS SINAIS OBTIDOS	33
4.4 PREDIÇÃO DE DESGASTES E AVALIAÇÃO VIDA ÚTIL	38
4.4.1 AMOSTRAGEM DOS SINAIS E RESULTADOS	38
5 MODELAGEM DO DPS	41
5.1 O SOFTWARE ATP	41
5.3. MODELOS DE REPRESENTAÇÃO DO DPS	43
5.3.1. MODELO CONVENCIONAL	43
5.3.2. PROPOSTA DE TOMINAGA ET AL.	44
5.3.3. MODELO DE KIM ET AL.	44
5.3.4. MODELO IEEE	44
5.4. ESCOLHA DO MODELO UTILIZADO	45
6. AVALIAÇÃO DE PRINCÍPIOS QUALITATIVOS NO ATP E SIMULAÇÕES.....	46
6.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS SECUNDÁRIOS	47
6.3. RESULTADOS E VALIDAÇÃO DOS SINAIS OBTIDOS	47

6.3.1. DESCARGA DE MENOR INTENSIDADE	47
6.3.2. DESCARGA DE INTENSIDADE MÉDIA	49
6.3.3. DESCARGA DE INTENSIDADE ALTA	50
6.3.4. SOBRE A ENERGIA DO SURTO	51
7. CONCLUSÃO.....	54
7.1. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
ANEXOS	58
ANEXO A - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE VARISTORES TKS	59
ANEXO B - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE VARISTORES TKS	60
APÊNDICES	61
APÊNDICE A – LINHAS DE TENDÊNCIA PARA OS PONTOS DISCRETOS DE TENSÃO	62

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de surtos elétricos na rede de energia é um fenômeno recorrente e de crescente aparição no cenário mundial. O aumento da emissão de gases poluentes na atmosfera acarreta em maior dinâmica das partículas de ar, resultando numa maior probabilidade dos raios se formarem (INPE, 2016).

Sabendo disso, as cargas elétricas e eletrônicas estão constantemente expostas e podem ser facilmente impactados pelo evento caso não haja as medidas de proteção adequadas para a instalação. Sendo assim, é notória a importância de se estudar a utilização de dispositivos de proteção contra surtos elétricos aplicados a instalações elétricas convencionais. Tendo em vista essa problemática, este trabalho tem por objetivo analisar o funcionamento de um dispositivo de proteção contra surtos elétricos (DPS) em aplicações distintas e diferentes fontes de danos, dispostas de acordo com norma NBR 5419.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Toda e qualquer instalação elétrica está constantemente sujeita a eventuais distúrbios que podem ocasionalmente ocorrer devido a diversos motivos. Dentro disto, é válido saber que dentro do escopo da geração de energia elétrica até a distribuição desta, há uma maior sensibilidade a perturbações elétricas principalmente no sistema de distribuição, em que há possibilidade de danos reais às cargas dos consumidores, que se refletem em mau funcionamento dos equipamentos ou até na queima destes.

Dito isto, uma das formas de assegurar melhor proteção de um sistema elétrico é através da utilização de um ou mais dispositivos de proteção contra surtos elétricos (DPS) junto às cargas ou junto ao quadro de distribuição, como é comumente mais utilizado.

Em geral, a ocorrência de surtos na rede elétrica se origina em duas formas distintas. A primeira delas é através de chaveamento dentro dessa mesma rede, tais como acionamento contínuo de equipamentos elétricos. O segundo caso se caracteriza pela aparição de descargas atmosféricas na rede por meio de um raio em instalações de até quilômetros de distância dos equipamentos suscintos ao fenômeno (ABNT NBR 5410, 2004).

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho é analisar o funcionamento de um dispositivo de proteção contra surtos elétricos (DPS) segundo a ABNT NBR 5419 com foco no estudo de vida útil e degradação com base em seus parâmetros principais. Os objetivos específicos são

estudar o comportamento elétrico do dispositivo tendo em vista sua composição básica e princípio de funcionamento, atribuir uma modelagem prática para este, utilizando o software ATP Draw e avaliar seus aspectos de funcionamento e vida útil através de simulações utilizando-se diferentes situações aplicáveis.

1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para que se torne possível a execução dos objetivos aqui expostos, foi necessário realizar previamente uma revisão na literatura acerca do tema abordado. As revisões foram feitas a partir de livros, artigos científicos, trabalhos acadêmicos, documentos normativos, dissertações de mestrado entre outros. Também foi feito um estudo prévio do software ATP Draw, abrangendo detalhadamente os pontos principais que possibilitassem uma fundamentação suficiente para a realização das simulações presentes no corpo do trabalho.

Para realização completa do estudo do DPS, foram tomados os parâmetros apresentados junto ao livro base da fabricante e a partir de então foi atribuído um modelo representativo para o dispositivo em interface ATP, o que possibilitou a aplicação deste em diferentes cenários simulados.

Posteriormente, um ensaio de tensão residual foi realizado nas dependências da Universidade de Brasília para captação dos pontos de baixa tensão da curva do varistor no DPS e um caso específico foi reapresentado para um estudo de degradação e vida útil. Concluído o ensaio, a simulação foi refeita no ATP e os resultados foram analisados, julgados e discutidos, de forma que ao fechamento deste trabalho foi possível validar o alinhamento com os objetivos gerais e específicos atribuídos anteriormente.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em 7 capítulos, sendo que o primeiro é o capítulo introdutório, e nele estão descritos a estrutura e os objetivos do trabalho.

O capítulo 2 aborda todo o referencial teórico do trabalho. Inicialmente é apresentado o cenário global de descargas atmosféricas, em que são apresentadas as características locais, o modelo de aterramento principal os componentes atuadores.

O capítulo 3 dispõe dos principais pontos referentes a vida útil do DPS, o escopo de estudos qualitativos e critérios de eficiência. No capítulo 4 é apresentada a metodologia e resultados dos ensaios de baixa tensão realizados com os 20 modelos de DPS CLAMPER e junto a esses também a análise e aspectos comparativos dos modelos entre si. Em seguida,

nessa mesma linha, extrapolações para um número de pulsos não identificados e critérios, definições e avaliação de vida útil foram apresentados posteriormente.

O capítulo 5 abrange a modelagem prática justificada de um DPS através do software ATP e contém a apresentação do modelo a ser utilizado nas simulações e as considerações utilizadas para que se chegasse a tal. A partir de então algumas simulações são apresentadas no capítulo 6 referentes à utilização de um DPS em regiões propícias para sua aplicação. Nesta etapa do capítulo será realizada a simulação do dispositivo acoplado junto à rede elétrica em suas principais regiões de atuação. Por fim, os resultados das simulações serão também apresentados de forma organizada, para cada caso proposto e as devidas análises e discussões serão tomados a seguir.

Finalmente, o capítulo 7 abrange a conclusão final deste trabalho, considerações finais e sugestões de trabalhos futuros com propósitos apresentados ao início deste.

2 SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SPDA)

O Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas foi descrito e elaborado pelas normas NBR 5419 e IEC 61024-1 para proteger as edificações contra efeitos diretos e indiretos de descargas atmosféricas (NBR 5419:2001, p.2). Trata-se de um conjunto de estratégias e mecanismos utilizados para realizar a manutenção da rede junto a uma descarga admitida na instalação elétrica ou arredores.

2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Descarga atmosférica é uma elétrica de origem atmosférica entre uma nuvem e a terra ou entre nuvens, consistindo em um ou mais impulsos de vários quiloampères (ABNT NBR 5419, 2001).

Em toda atividade atmosférica que envolve grandes movimentações de ar, tais como, erupções vulcânicas, tempestades, furacões e tornados é comum a ocorrência de descargas atmosféricas. As cargas acumuladas na nuvem induzem cargas de sinal contrário na superfície do solo e um campo elétrico se forma entre a nuvem e o solo. Dentro da própria nuvem e entre nuvens próximas existem cargas de polaridades opostas acumuladas em diferentes regiões, gerando também campos elétricos de altas intensidades. As descargas ocorrem quando os valores desses campos elétricos excedem o valor suportável pelo ar, levando à sua ionização. Como consequência, o ar que antes se comportava como um isolante passa a se comportar como um condutor, permitindo a circulação de cargas elétricas (INPE, 2016). A figura 2.1 apresenta a disposição das descargas atmosféricas ao longo do planeta.

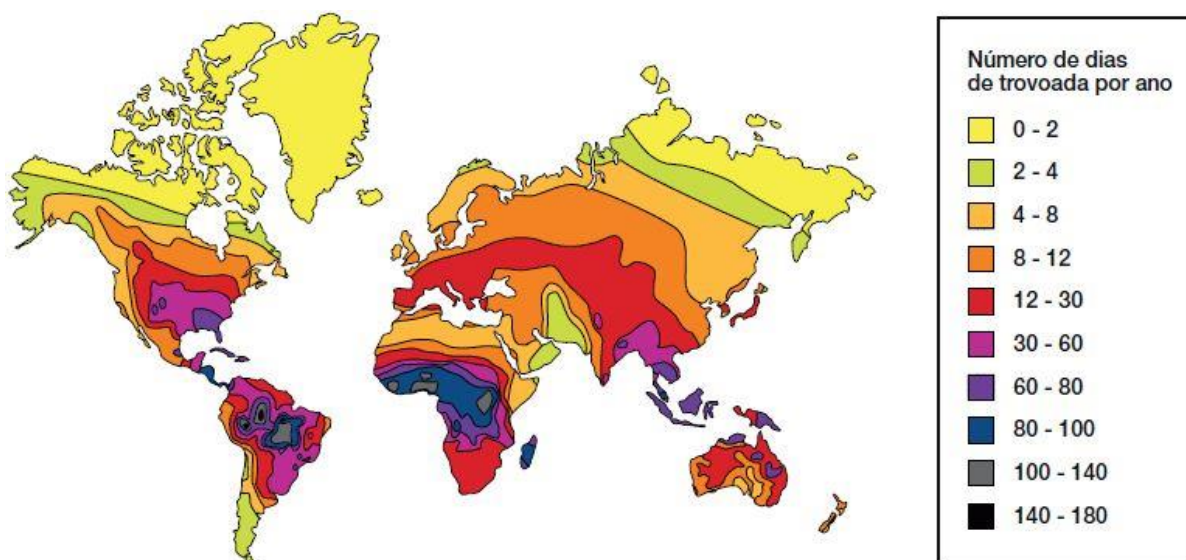


Figura 2.1 - Mapa cerâmico mundial (número de dias de trovoadas por ano). Fonte: CLAMPER, 2016.

A níveis práticos, a descarga necessita de um canal ionizado para que trace seu percurso até o solo, sendo assim, um trecho de ar é comprimido de 50 a 100m de altura é carregado eletricamente, realizando sua ionização. O processo se repete até que uma região com elevada densidade de cargas agrupadas se forme no ar e a diferença de potencial esboce o trajeto até o solo, em forma de uma descarga formada por elevados níveis de corrente.

2.1.1 Aterramento

Segundo a ABNT NBR 5410, aterrar significa colocar instalações e equipamentos no mesmo potencial de modo que a diferença de potencial entre a terra e o equipamento seja zero (ABNT NBR 5410:2004, pg126). Sendo assim, do ponto de vista de um SPDA, realizar o aterramento de uma localidade implica em interligar ao solo um elemento, ou conjunto de elementos condutores de eletricidade, para que se entregue a esses elementos a capacidade de direcionar ao solo as correntes indesejadas em circulação.

Se tratando de um sistema de proteção contra raios, como formas descargas pontuais, é preferível à instalação a adequação de um sistema de aterramento único, que possa ser integrado à estrutura. Esse sistema é regulamentado pelas normas NBR 5419 e NBR 5410 para que todos os elementos metálicos, condutores e de suporte sejam devidamente dimensionados de acordo com o tipo de material isolante, composição dos conectores e nível de proteção desejado (AVILA, 2010). É sugerido para o sistema de aterramento que se utilize de um sistema de equalização de potenciais através da conexão de um barramento de equipotencialização principal, denominado BEP.

2.1.1.1 Barramento de equipotencialização principal (BEP)

Conceitualmente, um barramento de equipotencialização principal (BEP) é um barramento destinado a servir de interligação de todos os elementos incluíveis na equipotencialização principal (ABNT NBR 5410:2004, pg8). Sendo assim, o BEP realiza a comunicação dos aterramentos totais da instalação e do neutro dos dispositivos de proteção localizados no quadro de distribuição e os direciona a uma malha de terra principal, por meio de uma barra metálica.

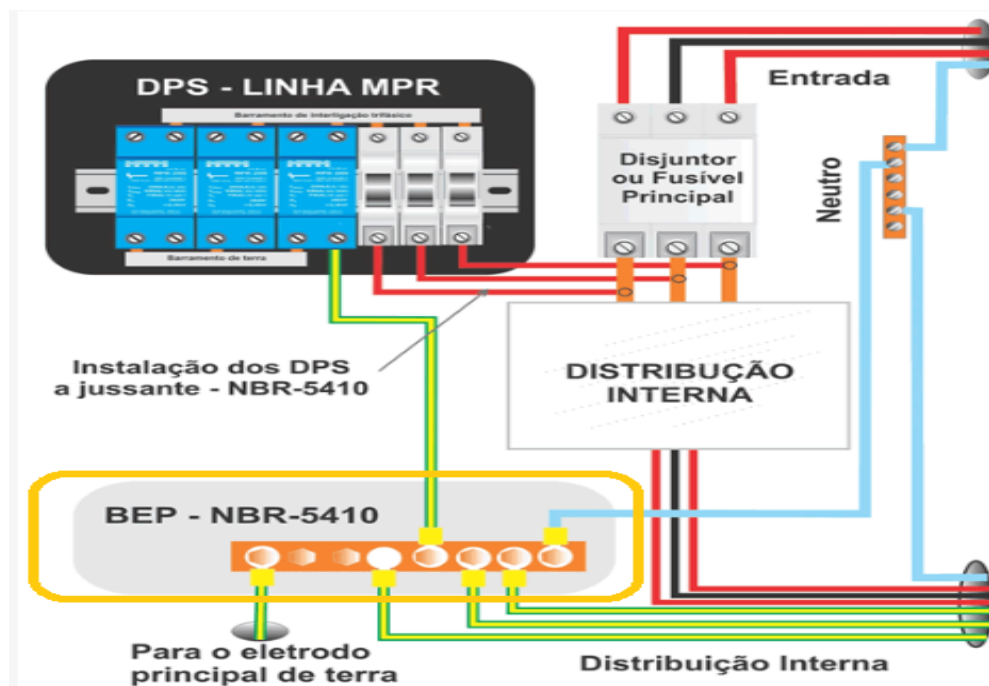


Figura 2.2 - Conexão do BEP com o DPS. Fonte: Adaptada de IEEE

Para o caso que propõe a norma, o BEP é suficiente para representar o aterramento principal da edificação, contudo, no desenvolvimento deste trabalho, dois outros tipos de aterramento serão levados em consideração: o aterramento referente a para raios ligados a torres de redistribuição de energia e o aterramento de transformadores de potência, que serão contemplados em um caso específico.

2.2 DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS ELÉTRICOS (DPS)

De acordo com a ABNT NBR 5419, o dispositivo de proteção contra surtos (DPS) é definido como “Dispositivo destinado a limitar as sobretensões e desviar correntes de surto. Contém pelo menos um componente não linear”. Esta mesma norma classifica o DPS em dois tipos: comutador de tensão e limitador de tensão. Um DPS comutador de tensão apresenta uma baixa tensão entre seus terminais quando no estado de condução. Já um DPS limitador de tensão apresenta uma impedância não-linear no estado de condução, resultando em uma tensão entre seus terminais que é próxima da sua tensão de proteção U_p (CLAMPER, 2016).

A figura 2.3 ilustra o diagrama elétrico de um DPS propício a redes de baixa tensão, usualmente instalado junto ao quadro de força.

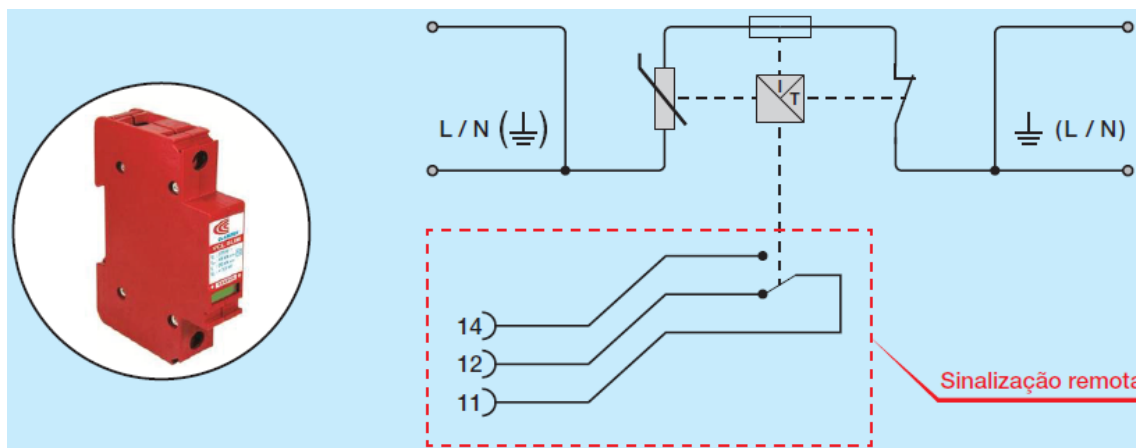


Figura 2.3 - Esquema de instalação do DPS na rede. Fonte: CLAMPER, 2016.

Observando-se a imagem é possível ver que o DPS pode exibir dois tipos diferentes de comportamento diferentes, o que varia de acordo com a impedância não linear mostrada. Essa impedância não linear é comum a todo modelo de DPS, se destaca como seu elemento mais notável e recebe o nome de varistor.

O princípio básico do dispositivo é que esse funcione como um elemento invisível ao circuito elétrico, pois para valores abaixo de sua tensão de disparo, a impedância variável é da ordem de $1\text{G}\Omega$, e o DPS age como um condutor qualquer, porém quando detectadas disparidades significativas nos sinais de tensão, o equipamento atua rapidamente, diminuindo drasticamente o valor dessa impedância para cerca de $0,1\Omega$ (CLAMPER, 2016).

2.2.1 Componentes Atuadores

Como já é esperado de um dispositivo de proteção elétrica, o DPS é composto por um conjunto de equipamentos de proteção combinados, e apesar de alguns apresentarem mais fácil noção prática de funcionamento, todos os elementos desempenham um papel diferente, e podem ser classificados como dispositivos comutadores ou curto-circuitantes, como centelhadores em geral e dispositivos limitadores ou não curto-circuitantes, como varistor e diodos supressores (AVILA, 2010).

2.2.1.1 Centelhadores

Existem atualmente duas classes principais de centelhador que é válido mencionar: os centelhadores a ar e a gás. Centelhadores a ar tem por objetivo realizar a defesa de primeira linha do surto, conduzindo a corrente I_0 a um chamado arco elétrico, que é formado pela sobretensão admitida entre dois eletrodos dispostos no ar, estabelecendo uma tensão de

disparo, que buscará um caminho de menor potencial e baixa impedância para realizar a passagem. Sua maior desvantagem, porém, é sua alta dependência a efeitos de ambiente para o correto funcionamento, no que diz respeito à exposição dos eletrodos (os níveis de temperatura, pressão e umidade devem ser regularmente controlados) (LEITE, 2001).

O centelhadores a gás, por outro lado, consistem na utilização de uma câmara preenchida com gás nobre (Argônio ou Neônio) a baixa pressão de forma que o gás seja totalmente inerte aos eletrodos. Isto possibilita ao centelhador obter grande estabilidade para com a tensão de disparo, pois permite que o espaçamento entre os eletrodos seja muito maior que no primeiro caso. Para tensões abaixo da sua tensão de disparo, a resistência do centelhador a gás é da ordem de $10\text{G}\Omega$, enquanto na condição de condução (arco elétrico) ela cai para cerca de $0,1\Omega$ (LEITE, 2001, 2016).

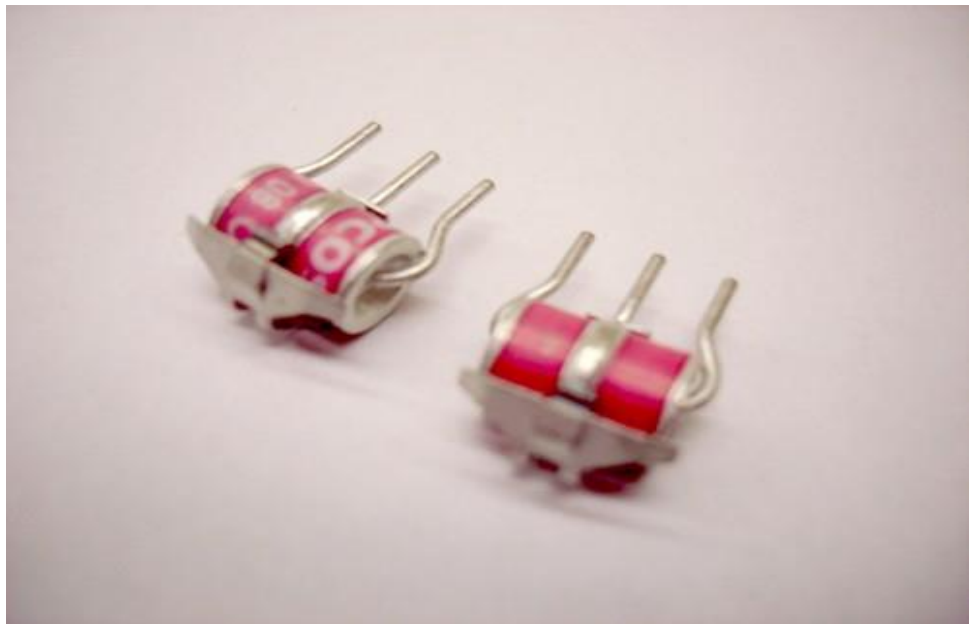


Figura 2.1 - Centelhadores a Gás. Fonte: Sala da Elétrica, 2015.

2.2.1.2 Diodos de avalanche ou supressores

Uma característica muito positiva do diodo supressor é que sua atuação não é sensível à taxa de crescimento da tensão aplicada. Além disso, os principais parâmetros do diodo podem ser determinados a partir do projeto do componente. O diodo pode ser projetado de forma customizada para uma determinada aplicação e este pode ainda ser fabricado ao uso específico do DPS, por exemplo. Essas características, aliadas à sua baixa capacitância,

tornam o diodo um componente adequado para a proteção de circuitos eletrônicos (AVILA, 2010).

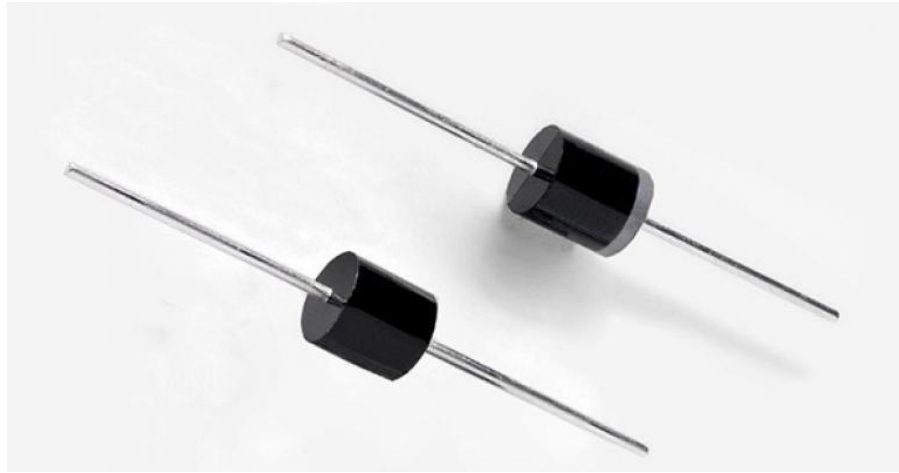


Figura 2.2 -Diodos Supressores. Fonte: Soldafria, 2018.

2.2.1.3 Varistor

O varistor (ou MOV) é formado por um material cerâmico termoformado de óxido de zinco associado com outros óxidos metálicos. A vantagem da utilização deste material na composição básica do varistor está na sua capacidade de imprimir resposta para com a tensão elétrica aplicada (RIBEIRO, 2003).

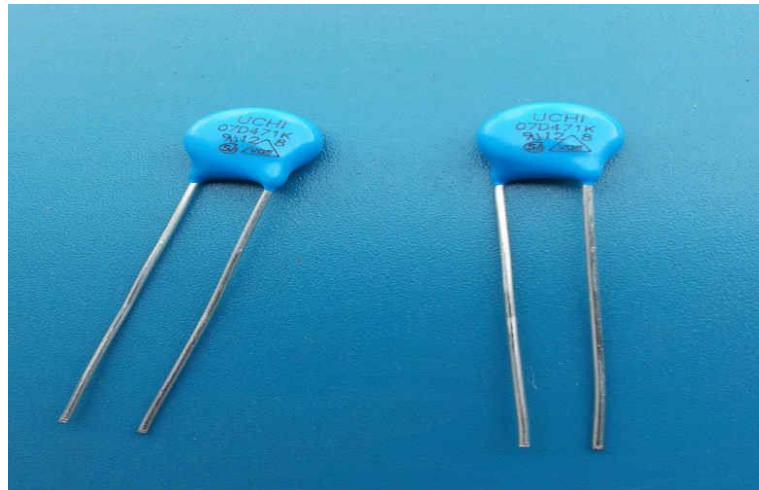


Figura 2.3 - Modelo Varistor. Fonte: Soldafria, 2018.

Um bom caminho para se explicar o funcionamento princípio do varistor é adentrar a área da ciência dos materiais, em que alguns conceitos envolvendo queda de tensão podem ser utilizados para explicar a relação do material utilizado com o fenômeno elétrico. Segundo Callister (2002), conceitua-se tensão elétrica de ruptura a tensão mínima que faz com que uma

parte de um isolador se torne eletricamente condutiva. Neste caso esse valor específico de tensão define o valor máximo de tensão aceitável ao material antes que o isolador passe a conduzir corrente elétrica.

Essa definição é amplamente utilizada em casos de materiais que expressem a propriedade dielétrica similares a uma curva de fluência, ou seja, quando a tensão aplicada excede a tensão máxima da região ôhmica, a resistência do material diminui de forma contínua em uma escala apropriada de magnitude, fazendo com que a corrente elétrica escoe pelos terminais abertos onde houve essa ruptura. Este efeito é denominado “efeito varistor” e é regido pela seguinte equação:

$$I = \left(\frac{V}{C} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

Em que I é a corrente, V a tensão aplicada, C uma constante dependente da microestrutura e do processamento aplicado e α o coeficiente de não linearidade (RIBEIRO, 2003).

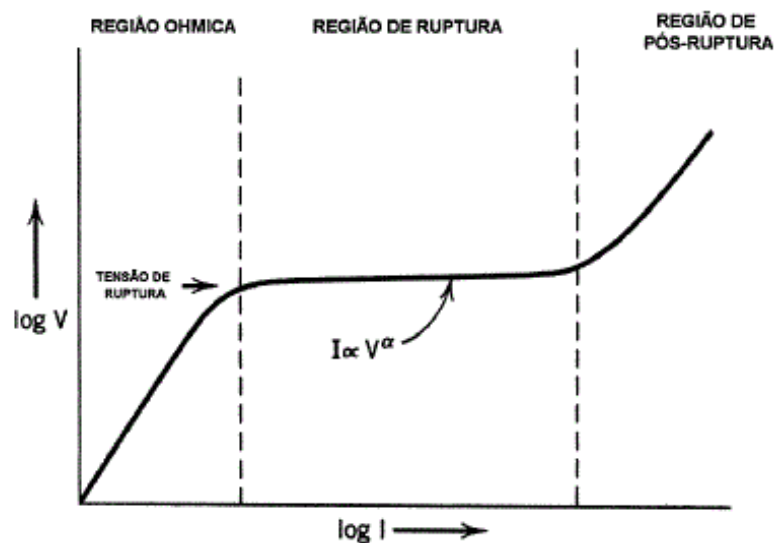


Figura 2.4 - Curva do Varistor. Fonte: Meister, 2005.

A partir do gráfico mostrado na figura 2.7 e a equação que a rege, é fácil perceber que quanto maior for o valor do expoente α menos inclinada estará a reta que rege o período estacionário da curva. Isso implica que melhor será a transição para o estado de abertura do circuito, e conseqüente o varistor será melhor. A equação (2.2) apresenta a forma de cálculo desse expoente, que é mais desejável na faixa de 10 a 50 (RIBEIRO, 2003).

$$\alpha = \frac{\log(J_2/J_1)}{\log(E_2/E_1)} \quad (2.2)$$

Em que J_1 e J_2 são os valores de densidade de corrente a 250 A/cm^2 e $0,5 \text{ A/cm}^2$, respectivamente.

No caso do óxido de zinco (ZnO), o valor da tensão de ruptura (E_r) é de 1590 V/cm e como material cerâmico, possui também uma boa resposta térmica, porém a justificativa de sua adequação ao uso para o varistor está em suas propriedades cristalográficas, já que sua rede possui algumas barreiras potenciais situadas na região de seus contornos de grão resultantes de processamentos térmicos formadores do material. Dessa forma, assim como o diodo Zenner, o varistor permite a passagem de corrente nos dois sentidos e atribui um rampeamento mais acentuado a partir do instante de atuação do varistor. (RIBEIRO, 2003)

A figura 2.8 ilustra a micrografia do pó varistor de ZnO obtida por varredura eletrônica, e nela é possível ver as barreiras potenciais compactas entre si, e desordenadas entre elas. Isto se dá devido ao não alinhamento da estrutura, o que torna a condutividade elétrica muito baixa, pois não há caminho alinhado para condução de corrente e portanto, uma elevada resistência está associada ao material.

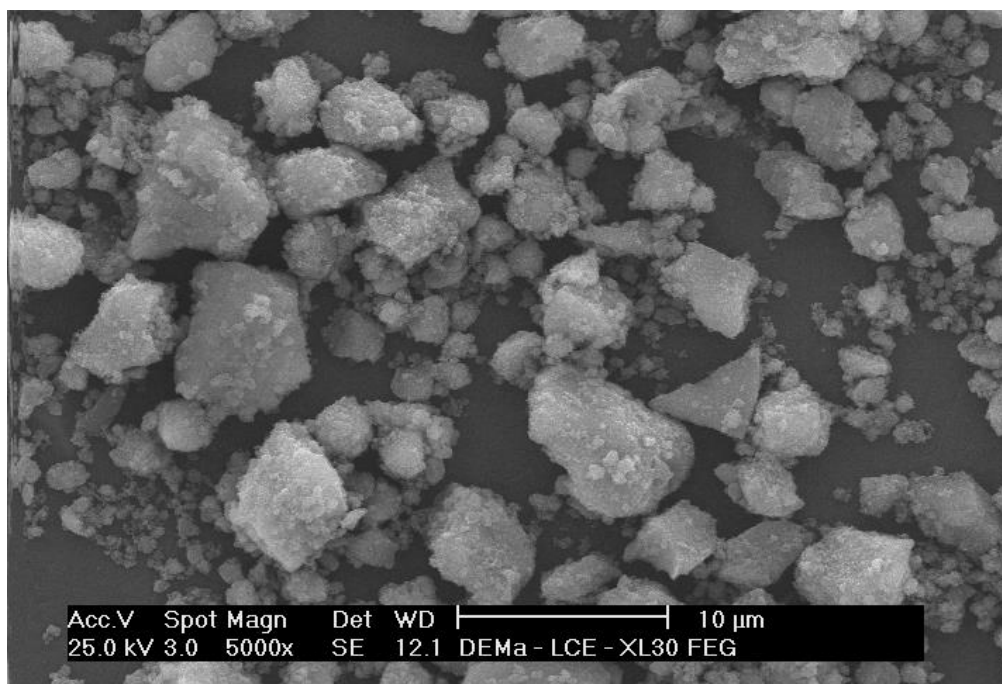


Figura 2.5 – Micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura. Ilustra a morfologia do pó varistor, obtido pelo método Pechini. Fonte: MEISTER, 2005.

Por outro lado, caso o varistor receba um valor de tensão acima do seu limite de ruptura, a tendência é que esses grãos de ZnO se alinhem de forma a atender ao comportamento da curva do varistor, formando um caminho ordenado para a passagem de corrente por diminuir significativamente a resistência caracterizada pela região inter-granular, como mostra a figura 2.9. Em outras palavras, a alternância entre os valores de resistência não se dá devido a uma configuração do dispositivo em si, mas sim devido à natureza de ordenação cristalográfica do material condutor.

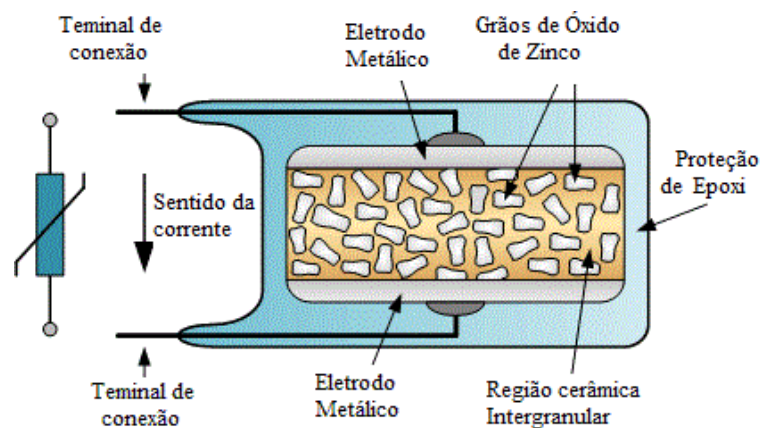


Figura 2.6 - Esquema representativo do varistor segundo sua disposição granular. Fonte: Adaptada de Eletronics tutorials.

3 DEFINIÇÕES PRÁTICAS DE VIDA ÚTIL SOBRE A CURVA DO VARISTOR

Um estudo de vida útil do varistor será realizado nos tópicos seguintes deste trabalho a fim de promover o refinamento da curva $V \times I$ utilizada nas simulações anteriores.

3.1 DETERMINAÇÃO DAS REGIÕES DA CURVA

Reavendo o foco para o modelo específico de ZnO, já é notório a este ponto que toda sua concepção e resposta foram projetados para obedecer a sua curva característica $V \times I$. Trata-se de uma curva não linear delimitada em três regiões específicas, sejam elas a região de baixas correntes (i), a região de alta não linearidade (ii) e de altas correntes (iii). Dentro disso, é possível afirmar que a distinção entre essas três regiões é o que diferencia cada atributo do dispositivo. A figura 3.1 ilustra a curva típica de tensão *versus* corrente do varistor.

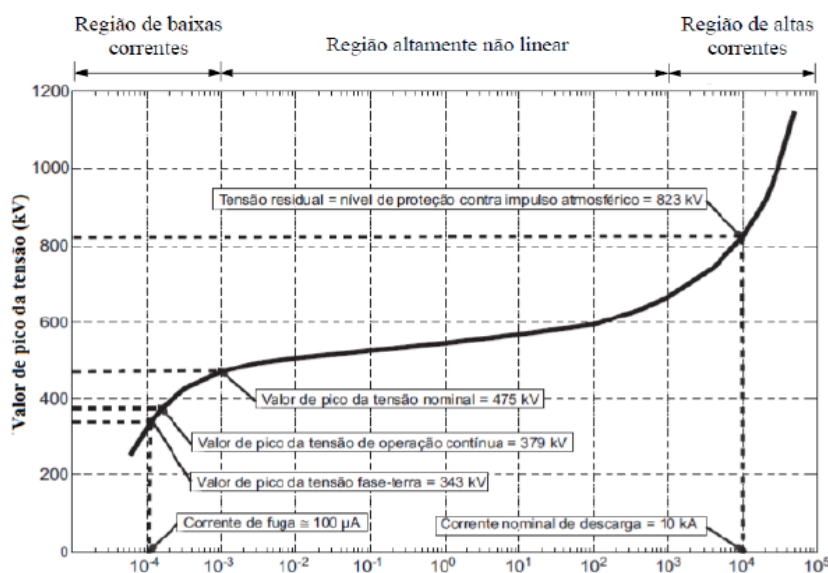


Figura 3.1 - Curva característica de um varistor de para-raios ZnO de 420 kV (HINRICHSEN, 2001).

De forma prática, cada região da curva tende a caracterizar uma face importante do varistor e diferentes tipos de estudo podem ser feitos para as diferentes delimitações. Inferências de aspectos quantitativos são mais suscetíveis de serem obtidas por abrangendo as regiões mais lineares, enquanto que as de aspecto qualitativo, na região intermediária, de alta não linearidade.

3.1.1 Região de Baixa Corrente

A região de baixa corrente (i) é a que mais se destaca na relação de aspectos físicos do material com as propriedades elétricas que este imprime. Como já mencionado anteriormente,

a curva do varistor é ditada pela equação (2.1), mencionada no item 2.2. Uma característica a se destacar nesta região da curva são seus baixos valores de densidade de corrente (J), que se encontram na faixa de 60 a 90 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, enquanto que para as regiões de média e alta correntes esses valores se situam de 1mA em diante, podendo alcançar valores acima de vários kA (VILAR, 2017).

Sabendo disso é correto afirmar, ainda sobre o equacionamento tomado para representar o chamado *efeito varistor*, que quanto maior forem os valores de densidade de corrente obtidos em seus terminais maiores serão também as variações de fase e ângulo da não linearidade (α) da curva. Isso implica que os valores de J que provocam pouca alteração nesse expoente α atribuem para o varistor a chamada região altamente linear da curva, que apresenta aproximações lineares da tensão de operação para com a tensão de ruptura elétrica, remetendo ao fato de que nessa região predomina a impedância associada aos contornos de grão do ZnO. Sendo assim, uma corrente elétrica muito acima do permitido para a tensão de operação especificada sob a ação dessa impedância será ajustada a um novo conceito de condução, que é o conceito de condução termiônica, a qual se refere ao efeito de condução que se dá em função de uma densidade de corrente de saturação J_s , uma constante A^* para a emissão dos elétrons no semiconductor e a temperatura T (Parui, 2013).

$$J_n = J_s \left(\exp\left(\frac{eV}{K_b T}\right) - 1 \right) \text{ e } J_s = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{K_b T}\right) \quad (3.1)$$

O fator crítico nesse estágio das baixas correntes, como é mostrado na equação (3.1), está na alta dependência da temperatura para a manifestação dessa densidade de corrente de saturação J_s , pois sua obtenção relaciona-se com o quadrado da temperatura, que tende a ser muito elevada na presença de sobrecorrentes. Isso faz com que a ocorrência de temperaturas mais altas modifiquem a impedância característica do ZnO a cada ocorrência de surto elétrico na rede, fazendo com que o valor de pico da tensão nominal do dispositivo se reduza pelo efeito de degradação térmica no varistor, caracterizando assim uma menor região ôhmica altamente linear e também uma nova região intermediária com um diferente expoente de α de não linearidade.

Entende-se então, dessa região específica da curva que em sua grande parte, correntes de fuga e seus aspectos condutivos estão diretamente associados com os mecanismos de degradação do varistor, portanto, o evento de sua aparição está intimamente ligado à

diminuição da capacidade de proteção do varistor e por consequência, sua vida útil como dispositivo.

3.1.2 Região Intermediária de Alta Não-Linearidade

Se por um lado na região de baixas correntes a temperatura é um fator expressivo a se considerar, na região intermediária (ii) da curva do varistor a influência de temperatura no processo passa a ser quase nula. Nesse estágio de atuação, o valor de tensão de ruptura elétrica é excedido e pequenos incrementos de tensão acarretam em grandes aumentos de corrente nos terminais.

3.1.3 Região de Alta Corrente

Na região (iii) de altas correntes, predomina o comportamento também linear, semelhante ao da região (i). Nesta etapa do processo, a operação do varistor atende ao princípio de condução controlada pela impedância dos grãos de ZnO, em que a curva característica volta a apresentar uma variação de tensão linear para com a corrente obtida.

4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para que seja possível alcançar, de forma concisa, os objetivos estipulados na parte introdutória deste trabalho, a modelagem do DPS deverá ser feita baseando-se na curva $V \times I$ do varistor. Partindo desse pressuposto, o escopo para o melhor detalhamento dos pontos de interesse na curva característica pode ser facilmente definido, já que é dito no item 3.1 que a região mais adequada para realização de estudos qualitativos no DPS é a região ôhmica, de baixas correntes. Sendo assim, dentro disso e das limitações presentes na Universidade de Brasília para realização de experimentos com média e alta tensão, a atribuição da região (i) da curva $V \times I$ será mais bem detalhada que as demais regiões, que terão seus pontos obtidos diretamente pelo catálogo do fabricante.

Para que seja possível atribuir o modelo matemático para validação dos dados da curva e predição de novos pontos, descrito no item 3.1, é necessário que haja uma base de dados existente. Essa base de dados foi elaborada a partir de um experimento laboratorial no Laboratório de Eletricidade, no campus FGA da Universidade de Brasília. O detalhamento do procedimento experimental é mostrado no subitem a seguir.

4.1 CARACTERÍSTICA DOS MODELOS DE DPS UTILIZADOS

Para realizar a sequência de testes que formarão a base de dados necessária para formulação do modelo e também das diferentes curvas, foram utilizadas dezoito amostras de DPS CLAMPER classe II diferentes, sendo que excluídos os dois primeiros, novos, cada modelo possui um histórico diferente de quantidade e intensidade de descargas sofridas.

A fins informativos, cada amostra de DPS acompanha o formato padrão de especificações técnicas rotuladas na região de frente do dispositivo, que detalha:

- Tensão nominal de operação $U_c = 275V$;
- Corrente máxima suportada $I_{MAX} = 45kA$;
- Corrente nominal $I_n = 20kA$;
- Tensão de proteção $U_p \leq 1,5kV$.

A imagem dos corpos de prova disponíveis para teste é mostrada na figura 4.1.



Figura 4.1 – Modelos de DPS CLAMPER utilizados no ensaio de baixa tensão.

Alguns modelos foram agrupados na mesma classe de varistor, pois sofreram o mesmo perfil de surto, quando submetidos à mesma descarga. Para esses casos, os ensaios foram realizados separadamente, porém como listados na tabela 4.1, são pertencentes ao mesmo grupo base.

Tabela 4.1 – Identificação dos agrupamentos e tipos de DPS Ensaiaados

Item	Grupo Base	Identificação do Modelo	Quantidade de Pulsos	Amplitude dos Pulsos
1	A	A1	0	0
2	A	A2	0	0
3	B	B	1	20 kA
4	C	C	2	20 kA
5	D	D1	3	20 kA
6	D	D2	3	20 kA
7	E	E	4	20 kA
8	F	F1	5	20 kA
9	F	F2	5	20 kA
10	G	G1	10	20 kA
11	G	G2	10	20 kA
12	H	H1	15	20 kA

Tabela 4.1 – Identificação dos agrupamentos e tipos de DPS Ensaiaados

13	H	H2	15	20 kA
14	I	I1	25	20 kA
15	I	I2	25	20 kA
16	J	J	30	20 kA
17	K	K1	1	44 kA
18	K	K2	3	44kA, 14kA, 20kA

4.2 O ENSAIO DE BAIXA TENSÃO

O experimento consiste basicamente em aplicar um incremento de tensão no varistor e medir o impulso de corrente associado para tal, fazendo com que seja limitada a tensão residual reproduzida em função da corrente.

Para realização do teste foi utilizado:

- 20 amostras de DPS's CLAMPER;
- 1 alicate amperímetro digital Minipa ET-3100;
- 1 multímetro digital Minipa ET-2402B;
- 1 variador de tensão trifásico (varivolt);

Das três fases VA, VB e VC provenientes da rede foi realizada a medição de tensão em paralelo com o DPS e em série foi medida a corrente, através do amperímetro. Um suporte estático foi também utilizado por realizar o acoplamento do DPS junto a um disjuntor, que era acionado para realizar a medição dos parâmetros e desligado em sequência, para a troca do dispositivo.

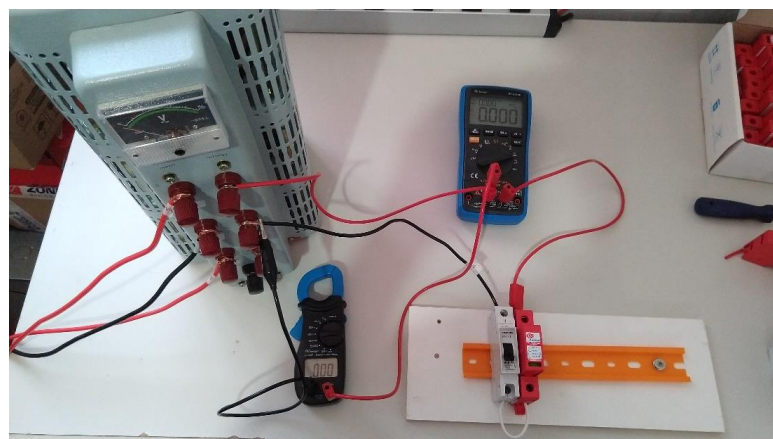


Figura 4.2 – Modelos de DPS CLAMPER utilizados no ensaio de baixa tensão.

O intervalo inicial das medições foi de 50V, até que a tensão alcançasse o valor de 250V. A partir desse ponto, as mudanças no comportamento da curva se tornam bem mais sensíveis e a tensão passou a ser variada com intervalos de 25V. Apesar da capacidade do varivolt suportar uma leitura de tensão de até 450V, o final do ensaio em cada peça se caracterizou pela leitura correspondente ao impulso de 1mA no varistor pois em conformidade com a teoria mencionado no item 3.1.1, mínimos incrementos de tensão a esse ponto resultam em uma considerável variação de corrente, refletindo o início do ponto de inflexão da curva característica que resulta no fim da região de baixas correntes.

4.3 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES

Após a realização dos ensaios, uma série de pontos de tensão e corrente foram aferidos dos medidores. Para os agrupamentos de A a J um total de oito pontos de tensão e oito pontos de corrente foram tomados, enquanto que para o grupo K a inflexão da curva se formou com pares de apenas sete e quatro pontos, respectivamente. A tabelas 4.2 e 4.3 dispõem dos valores obtidos.

Tabela 4.2 – Tensão e Corrente obtidos dos ensaios do primeiro ao o quarto campo

MODELO/ PARÂMETROS	V1 (Volts)	I1 (mA)	V2 (Volts)	I2 (mA)	V3 (Volts)	I3 (mA)	V4 (Volts)	I4 (mA)
A1 (Novo)	50	0,038	100	0,099	150	0,148	200	0,197
A2 (Novo)	50	0,05	100	0,113	150	0,168	200	0,218
B (1 Pulso)	50	0,053	100	0,112	150	0,168	200	0,216
C (2 Pulsos)	50	0,051	100	0,114	150	0,17	200	0,218
D1 (3 Pulsos)	50	0,054	100	0,116	150	0,172	200	0,22
D2 (3 Pulsos)	50	0,055	100	0,117	150	0,173	200	0,223
E (4 Pulsos)	50	0,054	100	0,115	150	0,171	200	0,22
F1 (5 Pulsos)	50	0,052	100	0,117	150	0,174	200	0,225
F2 (5 Pulsos)	50	0,05	100	0,112	150	0,168	200	0,215
G1 (10 Pulsos)	50	0,052	100	0,114	150	0,173	200	0,22
G2 (10 Pulsos)	50	0,05	100	0,113	150	0,169	200	0,219
H1 (15 Pulsos)	50	0,054	100	0,12	150	0,178	200	0,228
H2 (15 Pulsos)	50	0,049	100	0,112	150	0,165	200	0,212
I1 (25 Pulsos)	50	0,036	100	0,09	150	0,138	200	0,175

Tabela 4.3 – Tensão e Corrente obtidos dos ensaios do quarto ao oitavo campo

I2 (25 Pulsos)	50	0,056	100	0,118	150	0,163	200	0,222
J (30 Pulsos)	50	0,05	100	0,112	150	0,165	200	0,213
K1 (Pulso 44kA)	50	0,055	100	0,119	150	0,18	200	0,234
K2 (Pulsos 44kA, 14kA e 20kA)	50	0,067	100	0,197	150	0,52	184	1

Tabela 4.3 – Tensão e Corrente obtidos dos ensaios do quarto ao oitavo campo

MODELO/ PARÂMETROS	V5 (Volts)	I5 (mA)	V6 (Volts)	I6 (mA)	V7 (Volts)	I7 (mA)	V8 (Volts)	I8 (mA)
A1 (Novo)	250	0,25	275	0,282	300	0,339	324	1
A2 (Novo)	250	0,266	275	0,302	300	0,38	320	1
B (1 Pulso)	250	0,27	275	0,299	300	0,392	319	1
C (2 Pulsos)	250	0,27	275	0,304	300	0,395	321	1
D1 (3 Pulsos)	250	0,272	275	0,304	300	0,373	324	1
D2 (3 Pulsos)	250	0,274	275	0,31	300	0,423	318	1
E (4 Pulsos)	250	0,269	275	0,298	300	0,389	316	1
F1 (5 Pulsos)	250	0,275	275	0,311	300	0,428	317	1
F2 (5 Pulsos)	250	0,266	275	0,295	300	0,371	322	1
G1 (10 Pulsos)	250	0,273	275	0,306	300	0,409	317	1
G2 (10 Pulsos)	250	0,268	275	0,299	300	0,345	330	1
H1 (15 Pulsos)	250	0,279	275	0,321	300	0,498	311	1
H2 (15 Pulsos)	250	0,26	275	0,285	300	0,326	336	1
I1 (25 Pulsos)	250	0,214	275	0,237	300	0,275	325	1
I2 (25 Pulsos)	250	0,277	275	0,312	300	0,38	323	1
J (30 Pulsos)	250	0,26	275	0,288	300	0,328	342	1
K1 (Pulso 44kA)	250	0,311	275	0,426	298	1		

4.3.1 Amostragem dos Sinais Obtidos

A partir dos dados das tabelas, foram elaboradas várias curvas de dispersão, em que no eixo Y do sistema cartesiano estão apresentados os valores de tensão residual V e no eixo X, os valores de corrente nominal I_n . Neste sentido, as vinte curvas esboçadas representam justamente as vinte curvas características na região de baixa tensão dos varistores presentes

nos dispositivos de proteção contra surtos. É possível identificar os diferentes modelos pelo seu grupo base, que se distingue dos demais pela cor devidamente identificada na legenda da figura 4.3.

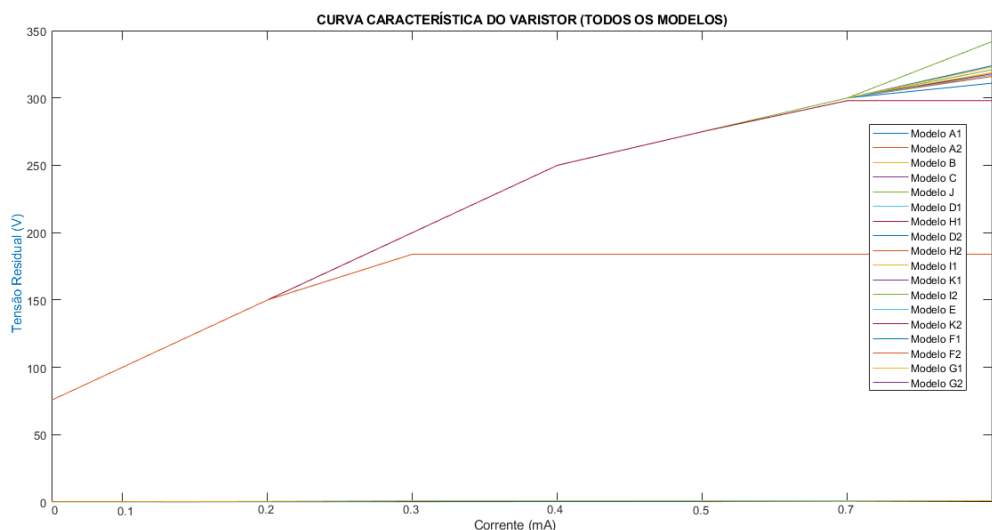


Figura 4.3 – Curva característica do varistor (Comparativo de modelos)

Pelo gráfico acima é possível perceber o comportamento relativo de cada modelo nas diferentes regiões da curva. Nos pontos iniciais é possível ver que a curva é fiel à teoria, visto que a linearidade dos modelos se mantém durante toda a região ôhmica. Após isso, alcançando o ponto de transição entre as regiões (i) e (ii) os modelos diferenciam-se principalmente por sua capacidade de proteção e desgaste térmico, em que é possível perceber nas inflexões principais da curva as irregularidades para cada modelo.

A figura 4.4 mostra os gráficos para os modelos B e C, que possuem históricos de um e dois pulsos de até 20kA sofridos, respectivamente.

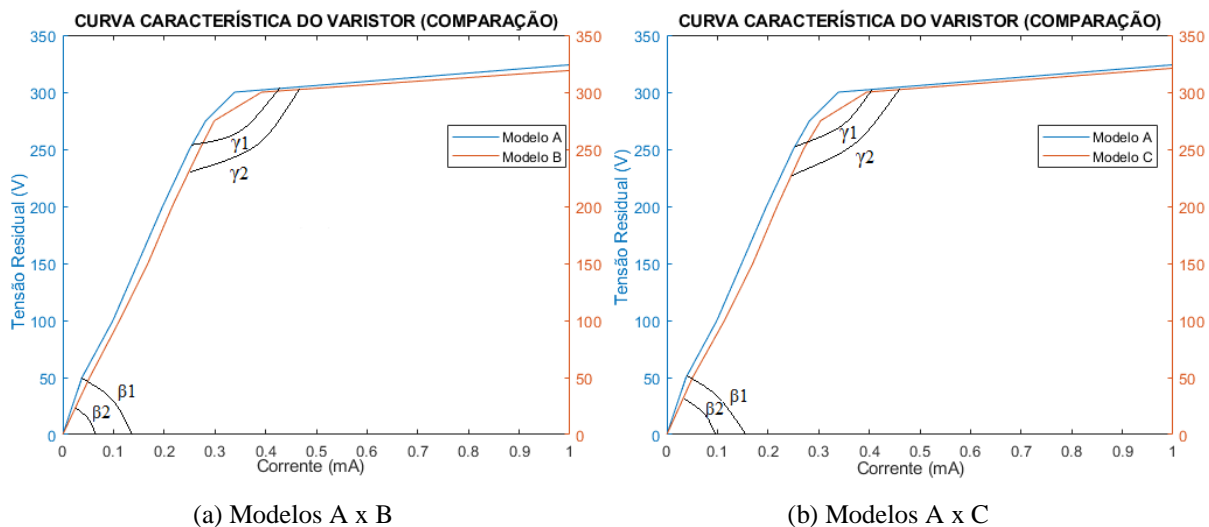


Figura 4.4 – Gráfico comparativo de curvas do varistor dos modelos B e C em relação ao modelo novo A.

A julgar pelos gráficos, é possível perceber que há dois parâmetros a se levar em conta para o efeito comparativo. O primeiro é o de alteração nas variações da corrente até a região de maior curvatura, pois a teoria enfatiza que linearidade se mostra na regularidade da curva, sem que haja deslocamento do ângulo β_1 original para um deslocado β_2 (evento típico para cada ocorrência de surto). O segundo ponto a se observar é o deslocamento da amplitude de tensão após a tensão de ruptura elétrica, que somada ao deslocamento da região de anterior introduz a degradação total do varistor, que é demarcada pela diferença entre os ângulos γ_1 e γ_2 , onde γ pode ser definido como combinação dos ângulos β e α (associado ao expoente de não linearidade).

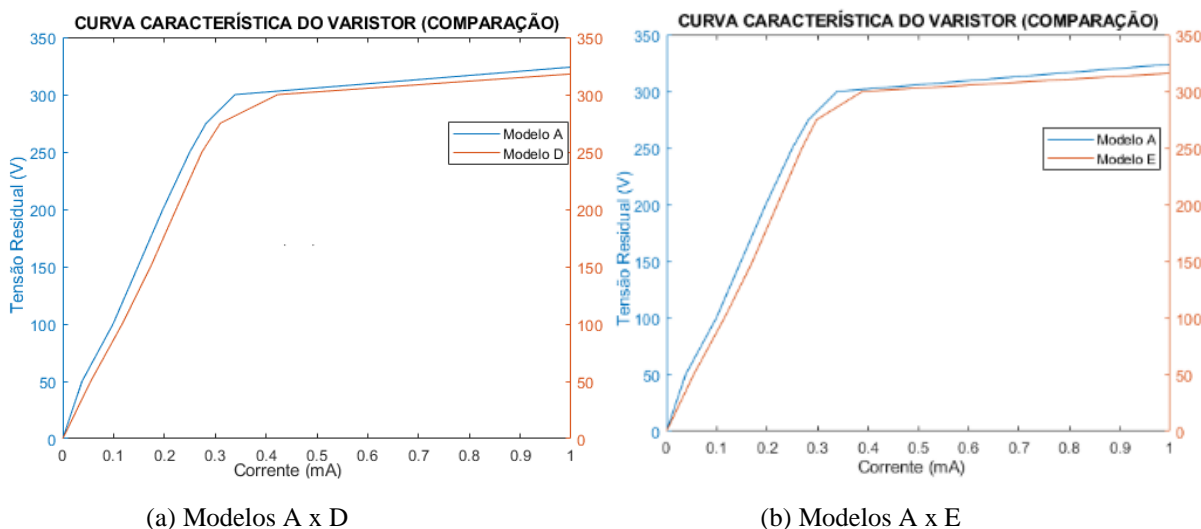


Figura 4.5 – Gráfico comparativo de curvas do varistor dos modelos D e E em relação ao modelo novo A.

Para os casos dos modelos D e E (figura 4.5) a degradação é proporcional à da figura 4.6, pois não houve diferença significativa quanto ao número de descargas, como sugere a imagem.

Já nos modelos F, G e H outro ponto chama atenção, pois já que o intervalo de descargas passa a ser maior (incrementos de 5 pulsos) o ponto de curvatura do ângulo β se torna menos agudo e mais irregular. A interpretação disso é que o ordenamento cristalográfico dos grãos de ZnO se torna mais lento em função do processo difusivo em si, e a capacidade de proteção é diminuída em virtude disso.

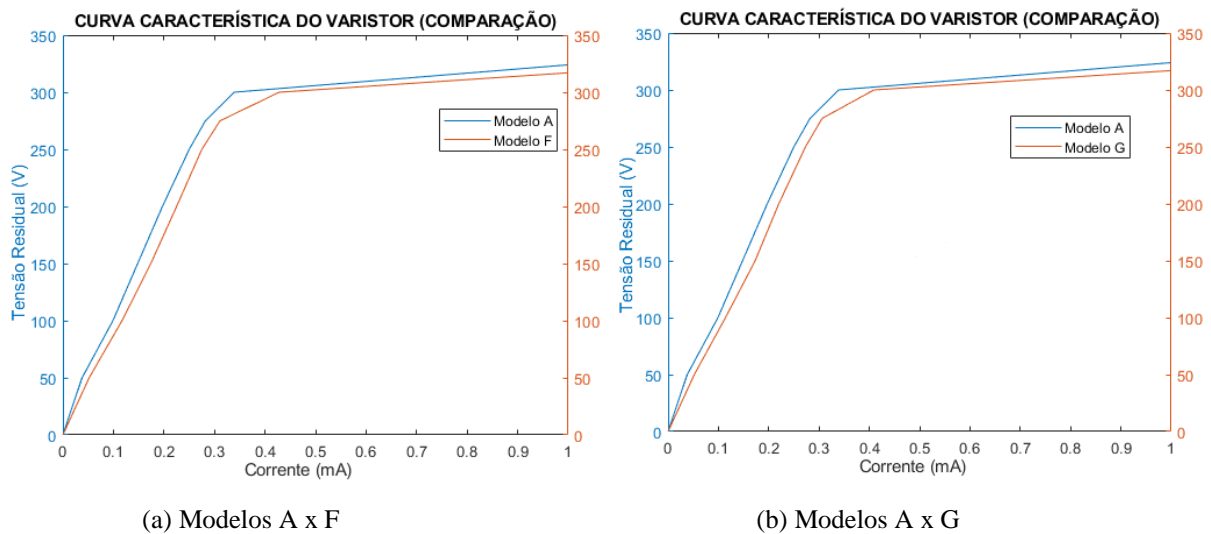


Figura 4.6 – Gráfico comparativo de curvas do varistor dos modelos F e G em relação ao modelo novo A.

Ainda nessa linha, na figura 4.7 se torna ainda mais evidente a dificuldade que o varistor demonstra de estabilizar o seu estado não linear de baixa impedância.

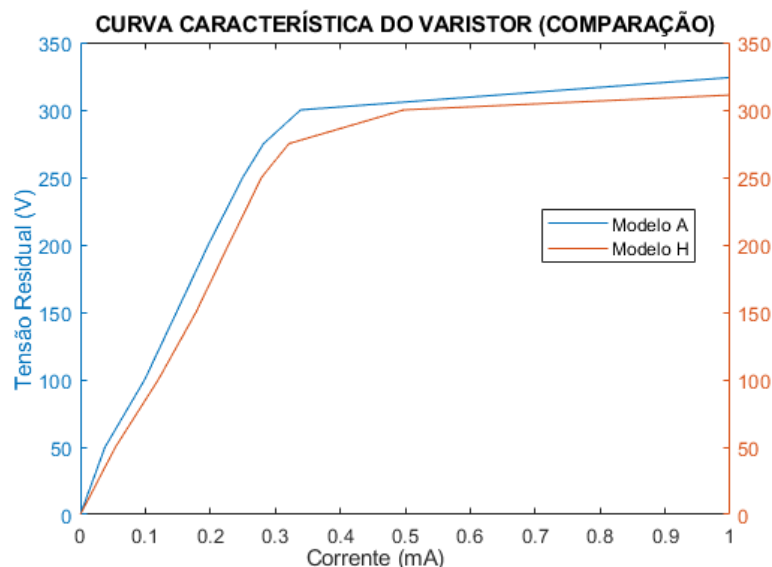


Figura 4.7 – Gráfico comparativo de curvas do varistor do modelo H em relação ao modelo novo A.

Para os modelos I e J o DPS se encontra já em estado avançado de degradação e suas curvas refletem baixa regularidade dos pontos e altos ângulos de abertura β .

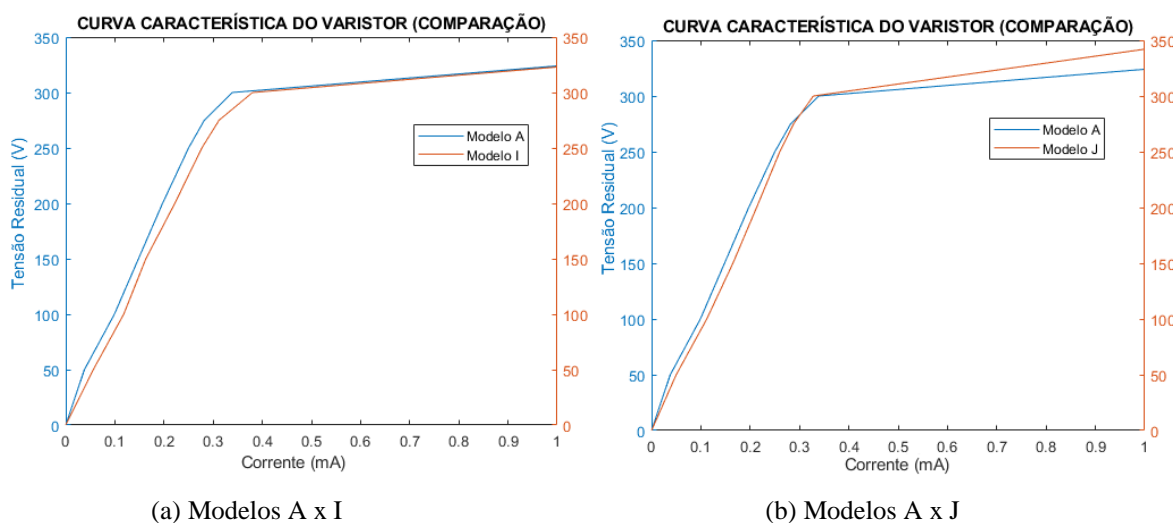


Figura 4.8 – Gráfico comparativo de curvas do varistor dos modelos I e J em relação ao modelo novo A.

Porém, dentre todos os casos ensaiados, destacam-se os modelos K1 e K2 como os de maiores degradações sofridas. Nesses dois dispositivos é visível quase não haver resistência por parte do circuito para alcançar a tensão de ruptura elétrica, tanto que para o modelo K2 nem se chega a definir um ponto de inflexão que caracterize essa grandeza. Esse argumento se justifica devido a baixa tensão de ruptura ser consequência direta dos rigorosos ciclos de descarga sofridos por esses modelos, pois um DPS classe II foi projetado para suportar

adequadamente apenas um impulso limitante de 40kA, mas o histórico dos dispositivos aponta um evento de 44kA para o modelo K1 e três eventos consecutivos sofridos para o modelo K2, sendo que o primeiro é de 44kA e os demais são de 14 e 20kA, respectivamente.

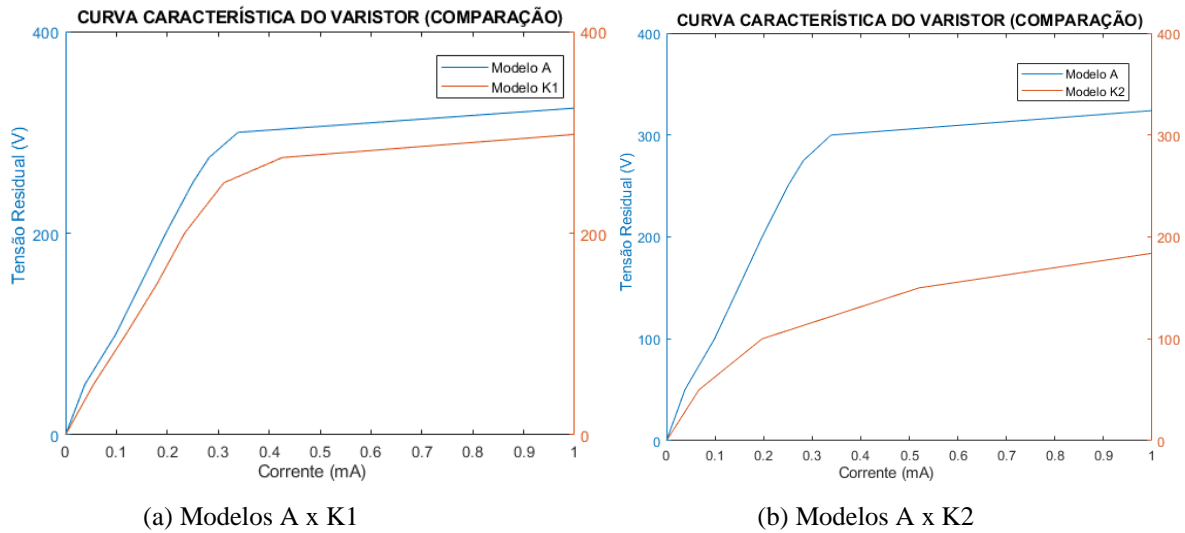


Figura 4.9 – Gráfico comparativo de curvas do varistor dos modelos K1 e K2 em relação ao modelo novo A.

4.4 PREDIÇÃO DE DESGASTES E AVALIAÇÃO VIDA ÚTIL

Em posse de todas as inferências provenientes das análises dos testes é de interesse avaliar o “relaxamento” ou desgaste do dispositivo pela progressão dos surtos, pois foi observado no comparativo dos gráficos que as curvas entre os modelos sujeitos à mesma intensidade de corrente só passaram a apresentar diferenças significativas a partir de 15 pulsos. Para avaliar melhor esse conceito, será implementado em ambiente MATLABTM um banco de dados contendo as curvas dos varistores das amostras de A a G, ou seja, os modelos dentro da mesma base de corrente.

Após inferidos esses valores, curvas típicas também poderão ser criadas com intuito único de prever as influências ao comportamento elétrico do DPS para o evento de uma descarga atmosférica de número de pulsos não registrados previamente no sistema

4.4.1 Amostragem dos Sinais e Resultados

Por se tratar de um caso com número menor de pontos foram aferidos do software, através da função *scatter* do módulo *statistics toolbox* basicamente as linhas de tendência discretizadas para as tensões entre 0 e 300V e também da corrente de 1mA. A figura 4.10 mostra a obtenção da primeira reta de tensão e também da reta de corrente.

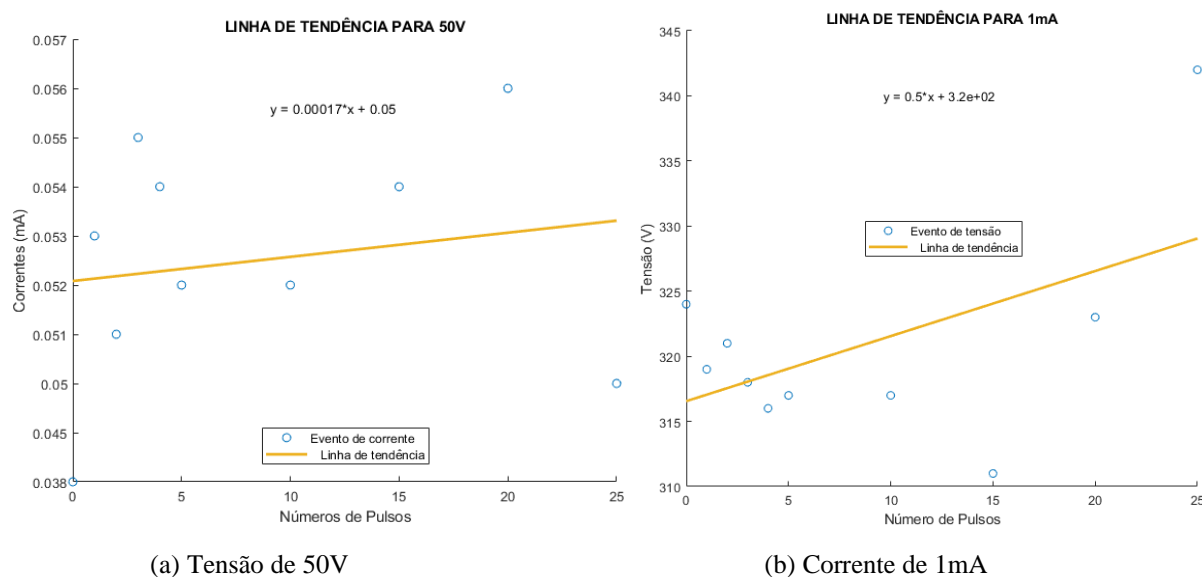


Figura 4.11 – Gráfico de obtenção das linhas de tendência equacionadas

Encontra-se também disponível no Apêndice A todas as figuras das linhas de tendência obtidas para as tensões de 100 a 300V.

Após encontradas todas as linhas de tendência, foi realizada a predição das curvas para dois casos distintos, sendo 30 e 50 pulsos e a tabela 4.12 apresenta os resultados.

Tabela 4.1 – Valores extrapolados do modelo simulado

Tipo/Tensão	Modelo L (30 Pulsos)		Modelo M (50 Pulsos)	
	Tensão	Corrente	Tensão	Corrente
V1	50	0,0551	50	0,0585
V2	100	0,1172	100	0,122
V3	150	0,1705	150	0,1709
V4	200	0,2272	200	0,232
V5	250	0,2751	250	0,2785
V6	275	0,306	275	0,31
V7	300	0,3853	300	0,3755
V8	343	1	351	1

A resposta gráfica foi também inferida pela comparação com modelos do banco de dados para verificar o nível de desgaste para a ação de vários ciclos de baixa corrente, conforme é mostrado na figura 4.12.

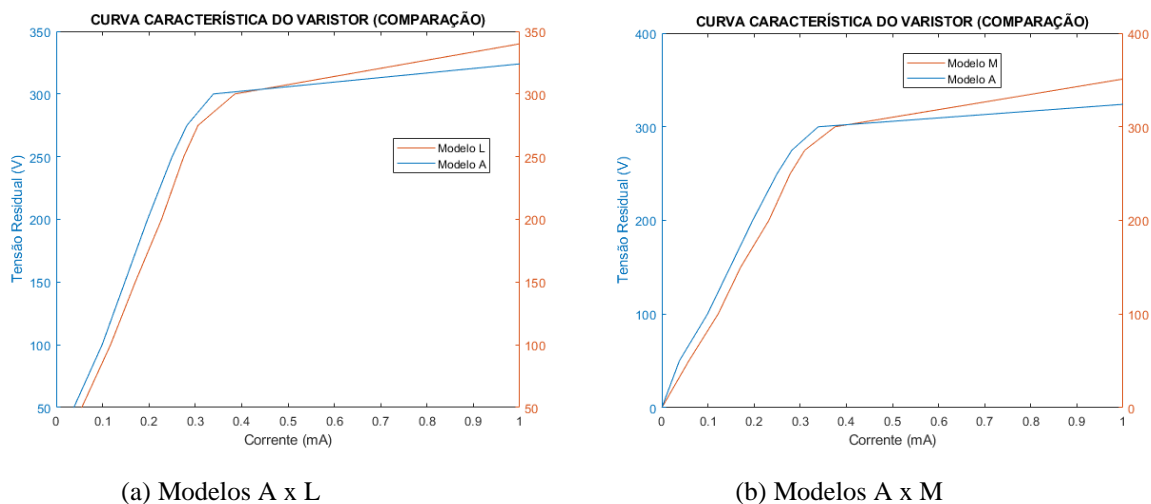


Figura 4.12 – Gráfico comparativo de curvas do varistor dos modelos L e M em relação ao modelo novo A.

Como conclusão dos estudos comparativos é válido dizer que após a ocorrência de 50 ciclos de descargas nominais de até 20kA a degradação física do varistor é real, visto que são alterados o deslocamento inicial da corrente e a inclinação de sua região de alta não linearidade. Porém, essas alterações, mesmo após 50 eventos, são praticamente desprezíveis se comparadas com as alterações sofridas pelos modelos K1 e K2 que sofreram descargas de 44kA.

Esse argumento permite afirmar que o varistor possui uma capacidade de regeneração muito bem definida, que permite ao DPS reconfigurar moderadamente os valores de sua curva característica após o surto. Porém, caso os valores de intensidade de corrente absorvida estejam acima do limite suportado, o varistor não será capaz de conduzir corretamente a energia total incidente e terá sua forma de onda severamente alterada por definitivo, como reflexo de um desgaste muito grande sofrido.

Uma clara forma de reiterar a afirmação acima é observar os casos do modelo K2, que sofreu três descargas distintas: 44, 14 e 20kA. Caso a descarga inicial fosse também de 20kA ou 14kA a curva do varistor deveria se comportar como um modelo do grupo D, mas devido a primeira descarga ter sido de 44kA houve ruptura elétrica definitiva da região ôhmica, que resultou no desgaste do DPS, que sofreu um “relaxamento” contínuo próximo ao ponto de inflexão para os surtos seguintes.

5 MODELAGEM DO DPS

Atualmente a representação computacional do DPS na literatura é uma ferramenta pouco explorada, já que se trata de um dispositivo composto por outros elementos que funcionam de formas distintas, e possuem composições também distintas de acordo com a classe em que se encaixam. Sabendo disso, a melhor forma de representa-lo em uma simulação é retratando seu elemento mais característico e comum a todas as classes, que é o varistor.

5.1 O SOFTWARE ATP

O programa Alternative Transient Program (ATP) é um pré-processador gráfico utilizado para obtenção de transientes eletromagnéticos. O programa apresenta uma variada quantidade de recursos práticos, em uma interface bem distribuída para o desenvolvimento de simulações elétricas, sobretudo. Por meio dele é possível modelar adequadamente os sistemas elétricos, reproduzindo o mais fiel possível a configuração elétrica real das redes, além de apresentar o diagrama unifilar em um ambiente gráfico (JÚNIOR, 2017).

As definições de interface são feitas por meio do ambiente ATP Draw, mas o ambiente de plotagem de sinais se dá através do PLOTXY, um ambiente dedicado a análise dos transitórios obtidos.

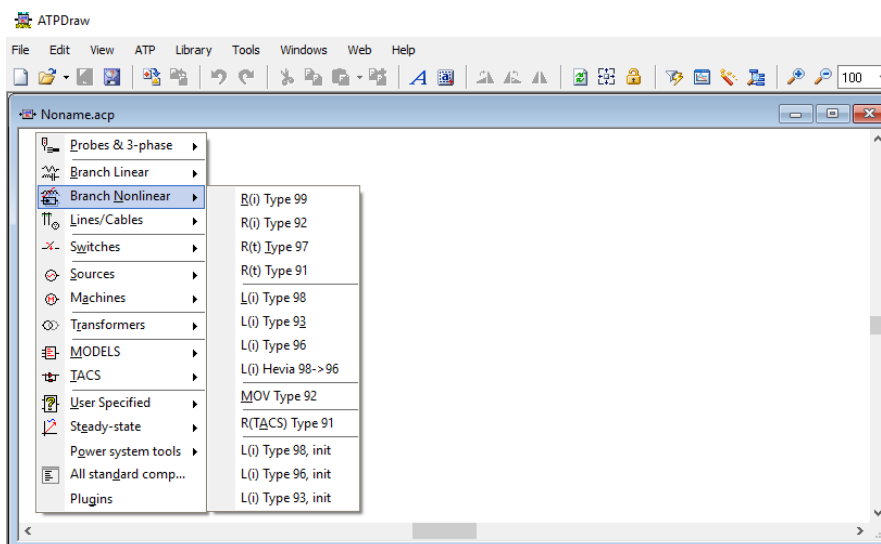


Figura 5.1 - Interface de desenvolvimento do circuito elétrico ATP Draw

A figura 5.2 representa a janela de plotagem do programa computacional.

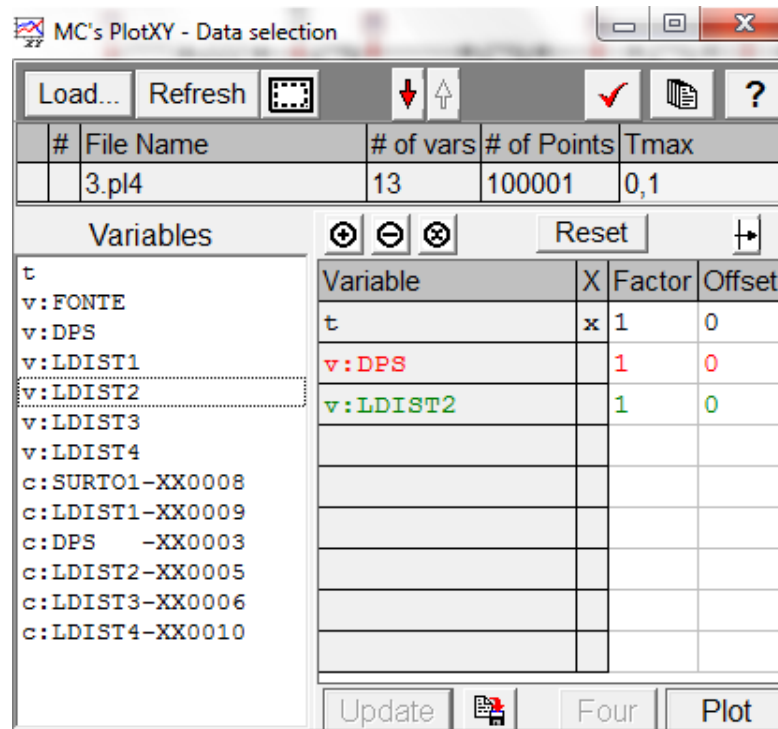


Figura 5.2 - Janela de plotagem do ATP

Pela figura 5.2 é possível ver que a plotagem pode ser feita para um único sinal de tensão ou corrente (em relação ao tempo) como também para a combinação de dois ou mais, sendo que os sinais serão diferidos pela cor da onda e por parâmetros comuns, como defasagem, frequência e amplitude característica que ela possui.

5.2. MODELAGEM PRÁTICA EM AMBIENTE ATP

A representação do varistor de óxido de zinco (ZnO) é feita no ATP através do elemento *MOV Type 92*, e a modelagem principal de seu comportamento elétrico (não linearidade) se dá através da característica tensão x corrente, que é parametrizada na configuração do elemento. Essa característica depende muito das formas de onda específicas do equipamento, e geralmente são pré-dispostas em forma de curvas no manual do fabricante. Dessa forma, para a realização da solução proposta neste trabalho, a escolha dos valores característicos dessa curva será feita baseando-se na característica 8x20 μ s, que se aplica para simulações de surtos típicos de descargas atmosféricas (MEISTER, 2005).

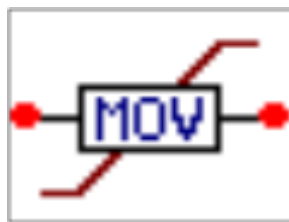


Figura 5.3 – Representação do modelo MOV Type 92 no ATP

De acordo com Meister (2005, p.37), os varistores possuem uma característica dinâmica dependente da frequência. Para surtos de frentes de onda rápidas com tempo de crista inferior a $8\mu\text{s}$, o pico da onda de tensão ocorre antes do pico de corrente e a tensão residual sobre o varistor aumenta com a diminuição do tempo de crista. Este aumento pode chegar a 6% quando o tempo da frente de onda é reduzido de 8 para $1,3\mu\text{s}$. Desta forma, a tensão sobre o varistor não é somente uma função da corrente de descarga, mas também da taxa de sua subida (Bayardi, 2003). Mas no caso do presente trabalho será considerado tão somente o surto convencional de resposta $8 \times 20\mu\text{s}$. A partir de então, foi atribuída no ATP uma característica para o elemento MOV, de acordo com diversas curvas que admitem esse tipo de onda..

5.3. MODELOS DE REPRESENTAÇÃO DO DPS

Partindo do pressuposto da completa configuração do varistor, alguns modelos de representação presentes na literatura são relevantes e passíveis de embasamento, os quais foram testados, validados e serão listados nos próximos itens.

5.3.1. Modelo Convencional

Neste modelo, é contemplado basicamente um dispositivo resistor não linear, que representa o varistor sem qualquer interação com os campos eletromagnéticos envolvidos.

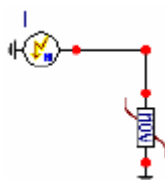


Figura 5.4 - Varistor representado no modelo convencional. Fonte: Meister

5.3.2. Proposta de **Tominaga Et Al.**

Neste caso, a representação é bem similar ao caso interior, adicionado a uma indutância em série. O valor da indutância pode ser estimado uma vez que seja conhecida a corrente sobre o dispositivo através de testes (Tominaga, 1979).

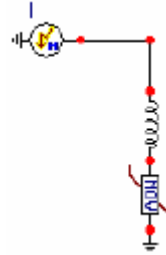


Figura 5.5 - Varistor representado no modelo Tominaga Et. Al. Fonte: Meister

5.3.3. Modelo de **Kim Et Al.**

Dessa vez, uma indutância não linear está em série com o varistor. A ideia desse modelo é prever com essa indutância boas respostas para ondas de impulso íngremes. A desvantagem da utilização deste modelo está na necessidade de um segundo artifício computacional para calcular a configuração dessa indutância.

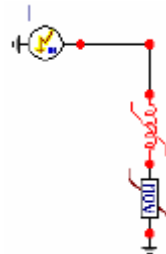


Figura 5.6 - Varistor representado no modelo Kim Et. Al. Fonte: Meister

5.3.4. Modelo IEEE

Neste modelo, duas seções de resistências não linear são associadas em série com um paralelo de indutâncias L_0 com R_0 e L_1 com R_1 . Esses paralelos são utilizados para representar as variações no campo magnético nas vizinhanças do varistor e a capacitância C representa a capacitância referente à distância do varistor até o solo.

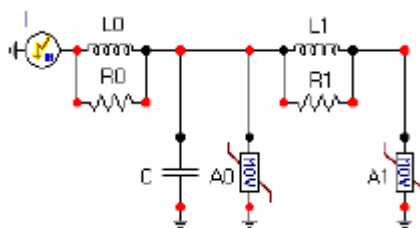


Figura 5.7 - Varistor representado no modelo IEEE. Fonte: Meister

5.4. ESCOLHA DO MODELO UTILIZADO

Baseando-se nos modelos apresentados e adaptando suas características principais, foi desenvolvido uma proposta para representar o DPS no ATP, fundamentado no uso de uma resistência não linear e um capacitor, ambos em série com uma indutância referente aos campos magnéticos próximos, e em paralelo entre si. A capacitância e impedância utilizados possuem o mesmo significado de quando utilizados no modelo IEEE. A figura 5.8 ilustra o esquema de montagem do DPS, que será utilizado em diferentes casos simulados.

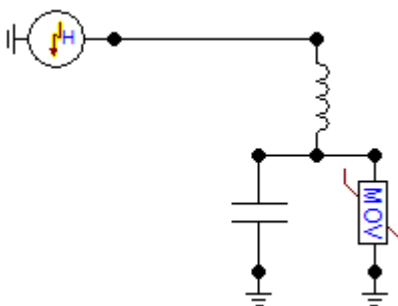


Figura 5.8 - Modelo desenvolvido para representação do DPS

O modelo dispõe basicamente do varistor em paralelo com a capacitância própria do dispositivo e uma indutância em série para representação dos campos magnéticos nas proximidades do DPS. A fonte do surto é simulada pelo elemento *Heidler*, e pode ser parametrizada fixando a tensão ou a corrente de disparo.

6. AVALIAÇÃO DE PRINCÍPIOS QUALITATIVOS NO ATP E SIMULAÇÕES

A composição da curva foi inserida no ATP e como visualizador é gerado o gráfico linear da curva, como mostra a figura 6.1 (referente ao modelo A1). Para efeitos de simulação, duas curvas ao todo foram configuradas, sendo uma para o modelo A1 e outra para o modelo K2, mas devido a natureza desse tipo de gráfico a comparação entre ambas é inviabilizada, já que só diferem entre si da região abaixo de 1mA (onde poucas mudanças de tensão são de alta relevância) e as escalas de tensão são de 100V.

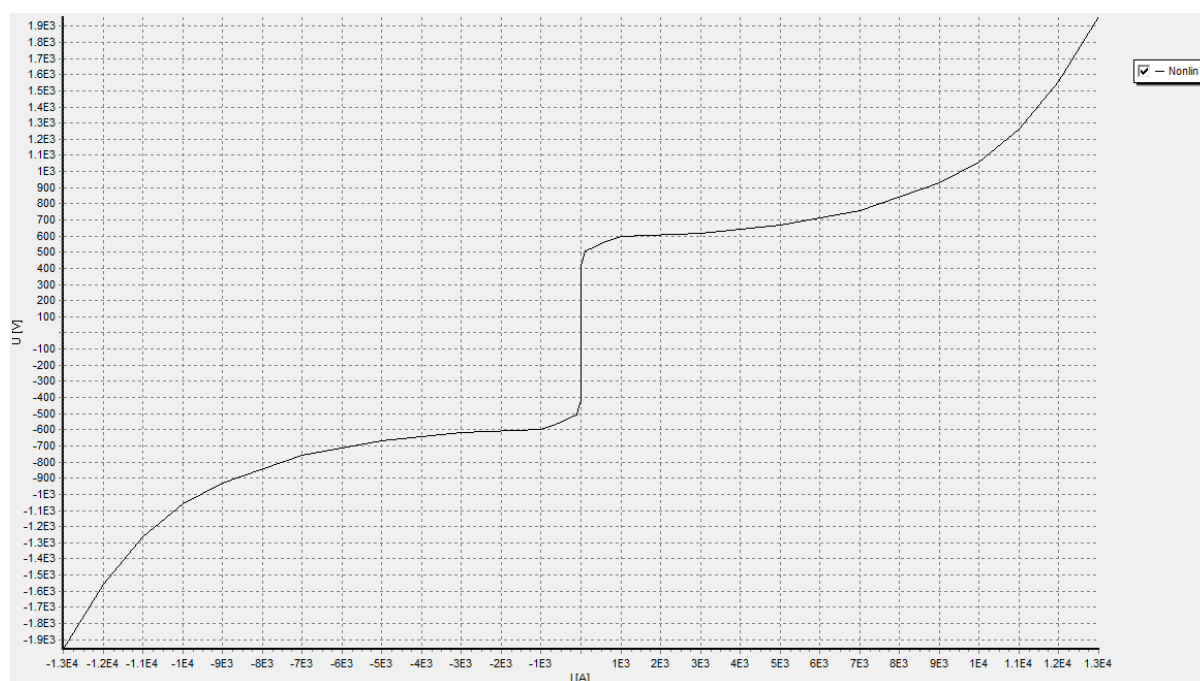


Figura 6.1 – Gráfico VxI do varistor impresso pelo Alternative Transient Program.

A representação do modelo foi feita utilizando um circuito tipo π equivalente a uma linha de distribuição para diferentes cargas, referente à utilização de um DPS classe II na redistribuição de energia para a residência.

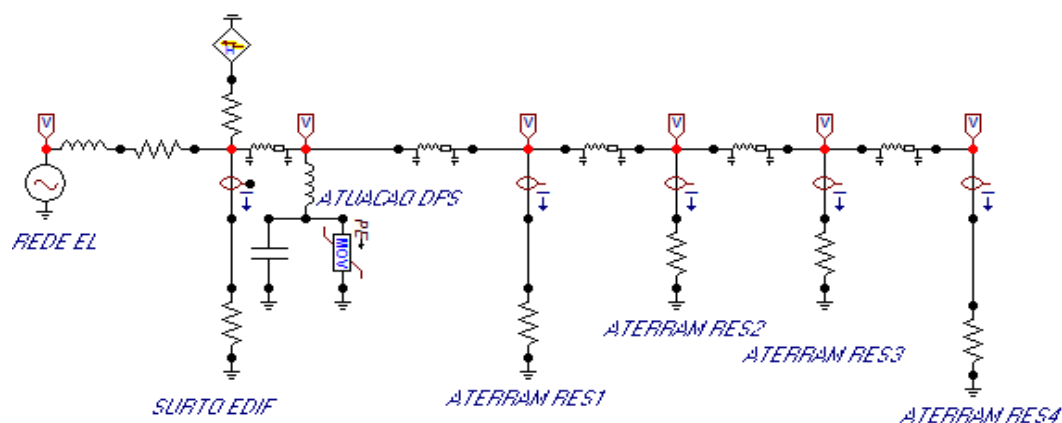


Figura 6.2 – Modelo de simulação do DPS classe II utilizado

6.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS SECUNDÁRIOS

A parametrização do circuito foi feita utilizando os valores de referência utilizados no modelo IEEE (Tominaga, 1979), com as resistências de linha de $0,186\Omega/km$ e também indutâncias e capacitâncias de linha de $7,0823 \times 10^{-04} H/km$ e $1,6244 \times 10^{-8} F/km$ respectivamente. Os valores de impedância simbólicos, ou seja, apenas para critério de leitura numérica do software foram inseridos em 10Ω para a resistência, $0,01H$ para a indutância e $0,01mF$ para a capacitância. As resistências de aterramento das cargas foram inseridas com 85Ω , de acordo com o exemplo prático de simulação da CLAMPER, em seu livro (Fig. 6.9).

Em relação à capacitância do dispositivo, foi utilizada a tabela de referência do varistor utilizado no DPS (modelo TVA34431KT). Para tanto, como disponível no Anexo B, foi utilizado uma capacitância de $6600pF$.

6.3. RESULTADOS E VALIDAÇÃO DOS SINAIS OBTIDOS

Para melhor analisar os efeitos de qualidade do DPS, foram simulados três tipos de surtos no intervalo de descargas mais comum entre os eventos dos modelos estudados. Para tanto, os sinais de tensão, corrente, potência e energia foram esboçados na interface de plotagem do ATP para as intensidades de 10, 20 e 40kA.

6.3.1. Descarga de Menor Intensidade

Num primeiro momento a descarga atmosférica foi simulada com um pulso de 10kA para o modelo mais novo A1 e o mais gasto K2.

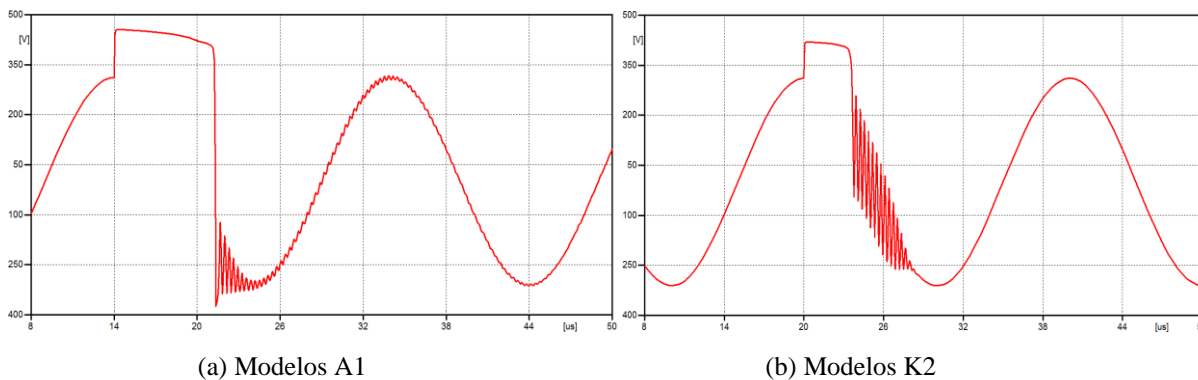


Figura 6.3 – Gráficos de tensões para 10kA sob a atuação do dispositivo de proteção contra surtos.

Pelos gráficos de tensão é importante observar que o processamento computacional do ATP conseguiu representar a clipagem da tensão no momento do surto abaixo dos 700V, obedecendo assim a tensão de referência estabelecida na parametrização do DPS. Outro ponto que vale destacar é a diferença notável no controle da sobretensão, que se torna mais irregular com o dispositivo desgastado. Isso ocorre, sobretudo, devido a baixa regularidade dos pontos na transição entre as regiões I e II, pois caso não haja uma boa definição das regiões ôhmica e não linear a transição entre mecanismos de regeneração termiônicas e o controle de sobretensões estará mais comprometida. Em geral, é esperado que o reflexo do desgaste esteja somente no efeito de degradação, esboçando no varistor uma menor capacidade de absorção de energia, mas nesse caso específico é visto que o modelo K2 já se encontra num estado tão desgastado que apresenta, inclusive, ausência de tensão residual do surto no ciclo seguinte da onda.

Da mesma forma os sinais de corrente também foram obtidos para ambos modelos nesse patamar do surto:

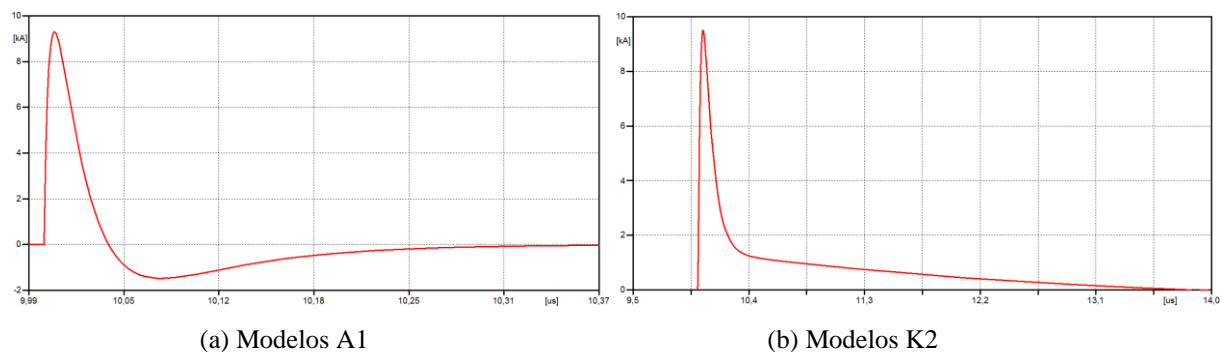


Figura 6.4 – Gráficos de corrente para 10kA sob a atuação do dispositivo de proteção contra surtos.

Em relação ao sinal de corrente, não foi possível observar uma distinção considerável entre os dois pulsos, com exceção da amortização e estabilidade do sinal após o surto.

Derivando, então, do ponto de partida desses mesmos sinais listados anteriormente, foi parametrizado no software que fossem impressos também os sinais de potência, basicamente tomados como produto de corrente e tensão e de energia total do surto, que é a distribuição de potência ao longo do intervalo útil da curva. Por também não apresentar variações significativas na forma de onda, a figura 6.5 apresenta o comportamento básico desse sinal obtido do modelo A1, mas que reproduz bem o ocorrido também para o modelo K2.

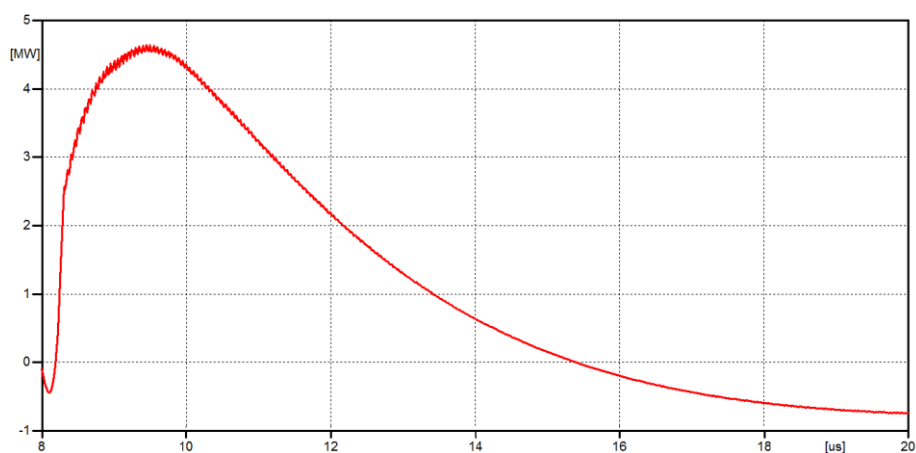


Figura 6.5 – Gráfico de potência para 10kA sob a atuação do dispositivo de proteção contra surtos.

6.3.2. Descarga de Intensidade Média

Para o segundo caso simulado, a descarga associada também foi de 20kA para os dois modelos de varistor, em que os picos de tensão em seus terminais se fixaram também em até 700V de amplitude, como mostram as imagens.

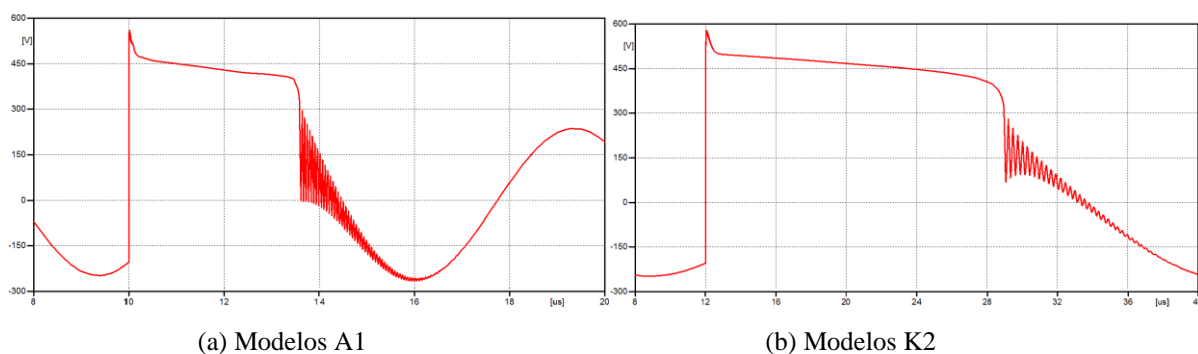


Figura 6.6 – Gráficos de tensão para 20kA sob a atuação do dispositivo de proteção contra surtos.

As correntes do pulso, por outro lado, sofreram alterações maiores em relação ao pulso inicial em 8us.

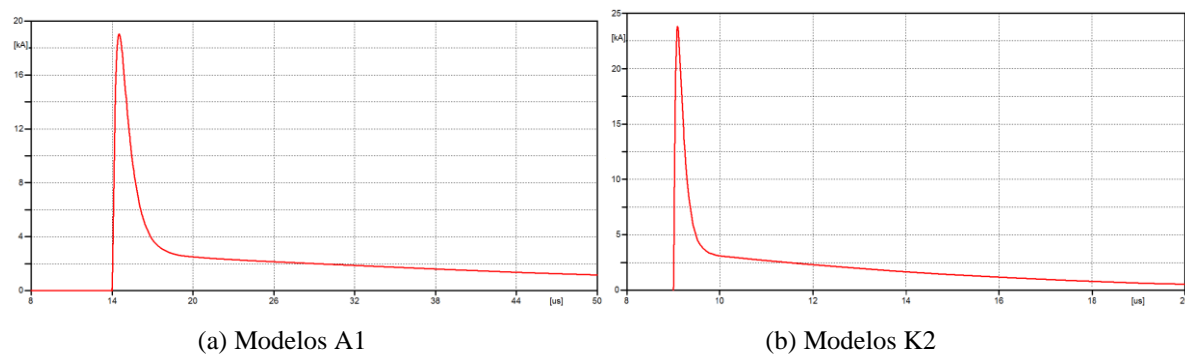


Figura 6.7 – Gráficos de corrente para 20kA sob a atuação do dispositivo de proteção contra surtos.

Quanto a potência e energia, é interessante observar que não só em intensidade houve mudanças significativas, mas também no tempo de estabilização dos sinais, de forma que para impulsos maiores de corrente foi constatado maior tempo de relaxamento do sistema, o que indica menor tendência regenerativa do varistor para esse patamar de energia que no caso anterior.

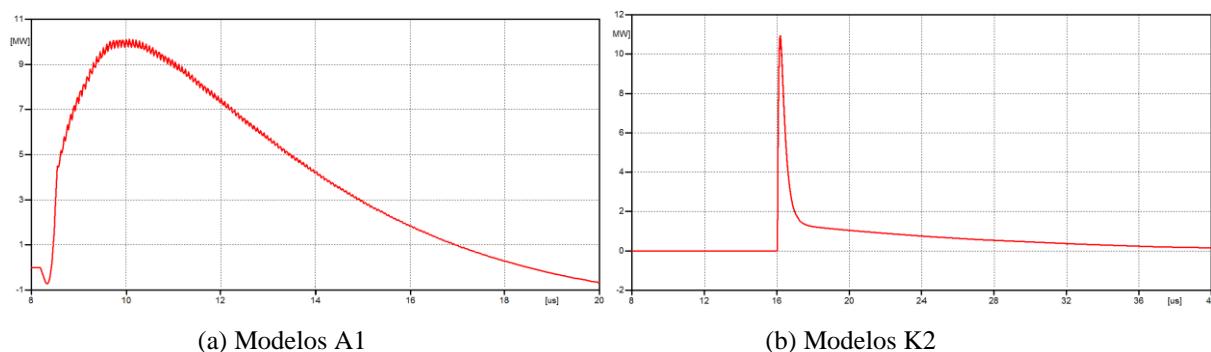


Figura 6.8 – Gráficos de potência para 20kA sob a atuação do dispositivo de proteção contra surtos.

6.3.3. Descarga de Intensidade Alta

No último caso, foi configurado o pulso de acordo com a maior intensidade registrada no histórico dos modelos, que é de 45kA. Apesar da baixa modificação dos valores de tensão, foi novamente possível perceber as alterações gerais na forma de onda, principalmente no que diz respeito à região de estabilização residual do surto, que se prolonga mais indicando a dificuldade de reação do circuito à condução da sobretensão aos níveis habituais em seu regime normal.

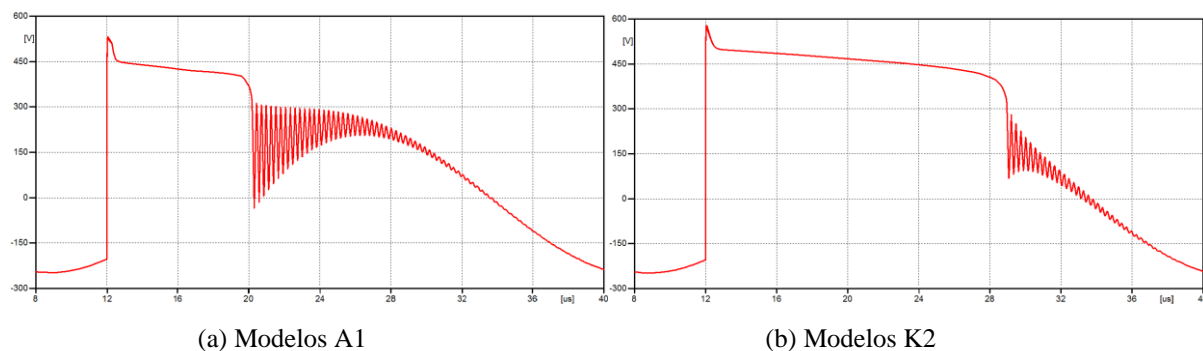


Figura 6.9 – Gráficos de tensão para 40kA sob a atuação do dispositivo de proteção contra surtos.

Já nos sinais de corrente, potência e energia é visível que nas formas de onda o tempo de estabilização é maior, o que reflete em sinais menos agudas de corrente e também de potência e energia, por consequência.

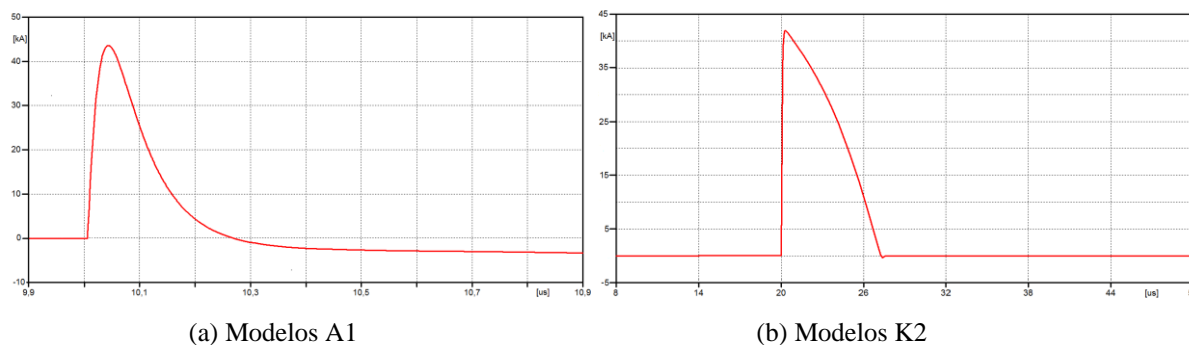


Figura 6.10 – Gráficos de corrente para 40kA sob a atuação do dispositivo de proteção contra surtos.

O ponto que chama mais atenção nesses gráficos é justamente a acentuação e irregularidade do segundo caso. Na primeira figura tem-se a forma de onda convencional da corrente de surto, enquanto que na segunda predomina a influência do desgaste do varistor devido aos pulsos já sofridos.

O formato mais agudo que o primeiro remete ao fato que há menor impedimento para a circulação de corrente que no primeiro caso, do modelo A1. Esse ponto é louvável, pois se alinha perfeitamente com o conceito de degradação do varistor, que quando novo possui ainda nessa região de transição uma impedância de grãos bem definida que fornece uma moderada impedância para a passagem da corrente. Entretanto, quando degradado, o varistor tende a sobrepor grande parte dos pontos de corrente para os diferentes passos de tensão, em que não há valores habituais de tensão associada ao ponto de inflexão em 1mA.

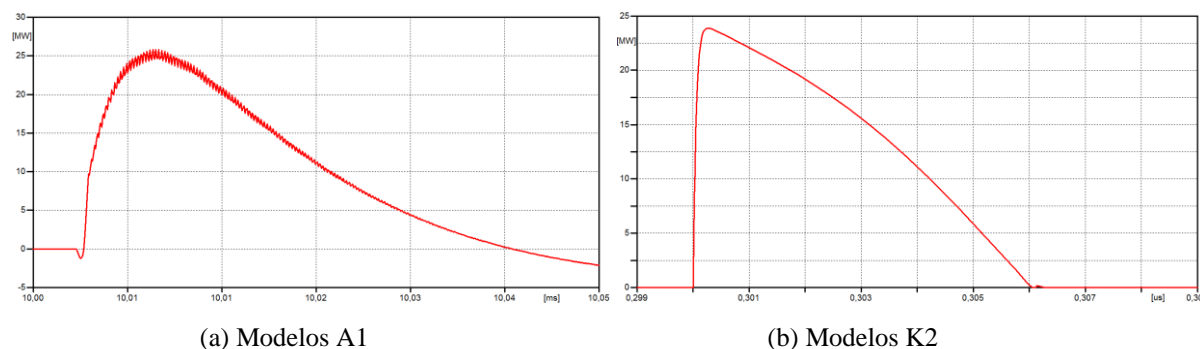


Figura 6.11 – Gráficos de potência para 10kA sob a atuação do dispositivo de proteção contra surtos.

6.3.4. Sobre a Energia do Surto

Do ponto de vista de capacidade de absorção energética, foram gerados três gráficos referentes à energia do surto, a fim de mostrar o comportamento para os três tipos de descargas simuladas. A forma de onda desse tipo de gráfico é bem característica e não há alterações relevantes de um modelo para outro a fim de que se estabeleça uma análise

comparativa com o varistor K2. Mediante a isso só foram gerados os gráficos para o modelo novo, com intuito de embasar e mostrar a conformidade dos valores de energia simulada para com o referido em teoria, dos efeitos de degradação e capacidade regenerativa e a energia de referência do fabricante, disponível no anexo A.

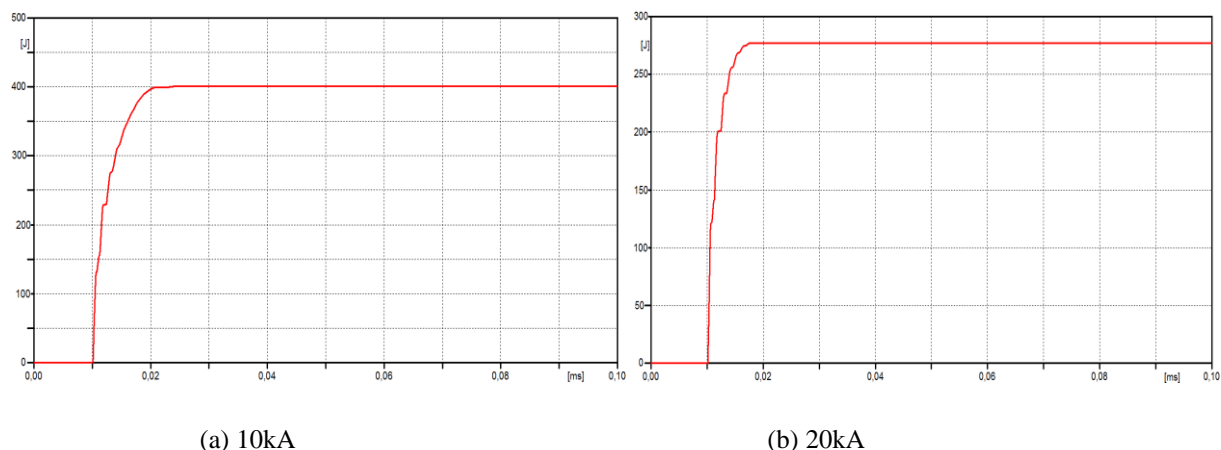


Figura 6.12 – Gráficos de energia no varistor sob a atuação do dispositivo de proteção contra surtos modelo A1.

A figura 6.12 indica que as energias máximas de surto registradas variam entre os níveis de 250 a 500J no período transitório que inicia a atuação dos dispositivos. O conceito se confirma observando o catálogo disponível do varistor, que aponta a energia máxima de operação em 860J, que é o ponto em que os desgastes significativos se iniciam.

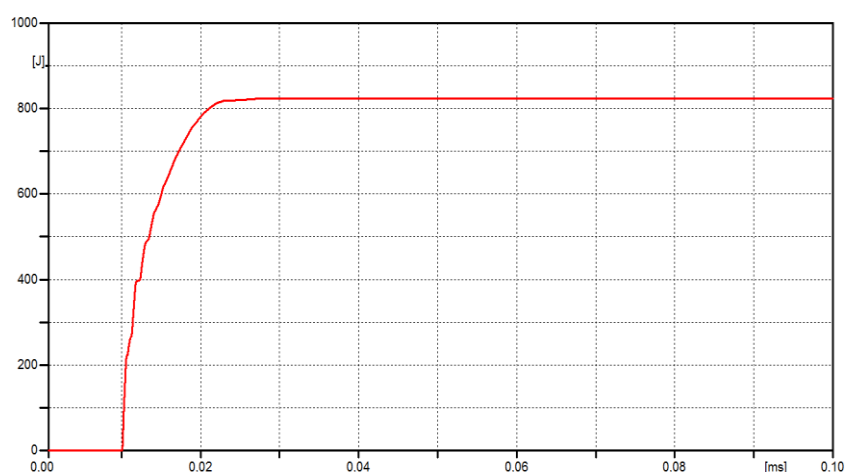


Figura 6.13 – Gráfico de energia para 40kA no varistor sob a atuação do dispositivo de proteção contra surtos modelo A1.

Por outro lado, analisando as descargas de 40kA, são apresentados valores de energia por volta de 820J, que é bem próxima ao limite de aceitação do varistor. Tendo em vista que as descargas maiores reais nos dispositivos CLAMPER K1 e K2 foram precisamente de 44kA é bem provável que esse valor limitante tenha sido ultrapassado em algumas dezenas de joules.

O ponto chave dessa análise é a percepção de que o desgaste permanente se inicia por volta de 40kA, mas consequentemente, os dispositivos com surtos de menor intensidade, seja de 10 ou mesmo 20kA apresentam valores de energia dentro da região admissível portanto não sofrem alterações definitivas na forma de onda da curva do varistor.

7. CONCLUSÃO

Em geral, foi possível estabelecer todo o princípio de funcionamento do dispositivo de proteção contra surtos, atribuir uma modelagem matemática e prática para os modelos e possibilitar, a partir desses modelos a previsão do comportamento de um modelo até mesmo desconhecido. É válido, também, destacar que toda a modelagem se dispôs validada e em conformidade com as informações dispostas pelo fabricante a respeito do varistor.

Foi possível também delimitar a função de cada região da curva característica do dispositivo e a partir dessa, estabelecer critérios de vida útil e degradação do DPS através dos ensaios realizados e da simulação computacional. Dessa forma, conclui-se neste ponto que o presente trabalho pôde alcançar com sucesso os objetivos traçados inicialmente, manteve concordância com a literatura e se prestou a realizar a validação por diferentes meios distintos, seja prático ou fundamentalmente.

De um ponto de vista mais abrangente, um dos pontos principais da elaboração desse tipo de estudo é que é de muita valia a possibilidade de empregar a visibilidade prática dos fenômenos elétricos em determinada situação sem que haja necessidade de um investimento em mecanismos de potência e dispositivos elétricos. Pensando nisso, no estudo do DPS esse tipo de abordagem é ainda mais suscetível, pois é certamente um dos elementos da área de proteção mais limitados em termos de condições de operação, já que desse é exigida uma condição de altas correntes para que o estudo possa ser desenvolvido. Por outro lado, é também de igual importância a capacidade e conhecimento técnico apropriado por parte do engenheiro de delimitar o caráter interpretativo para analisar, modelar e adequar a situações diversas o uso de um dispositivo desse porte.

7.1. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, para um possível desenvolvimento de trabalhos nessa linha um desenvolvimento matemático mais aprofundado referente às demais regiões da curva característica do varistor, sejam elas a intermediária e a de altas correntes. A grande vantagem da exploração dessas regiões é que essas não se limitam ao estudo de degradação e desgaste, mas um desenvolvimento qualitativo pode se empregar também tanto a critérios de eficiência, para melhorias no próprio varistor quanto aos mecanismos de condução, nos centelhadores ou diodos, por exemplo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PAULINO, José O. S.; BARBOSA, Célio F.; MOREIRA, Ronaldo K.; BARBOSA, Wagner A.; LOBO, Marcelo A. F.; LOBO, Ailton R. **PROTEÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS CONTRA SURTOS ELÉTRICOS EM INSTALAÇÕES**. Minas Gerais, 2016.

CLAMPER. **QUADROS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA**. Minas Gerais, 2010.

AVILA, Carlos E. Silveira. **DPS – DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS E SUAS APLICAÇÕES EM CFTV E EM TELECOMUNICAÇÕES**. Itatiba, 2010.

NBR5410/04. **Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT, 2004.

NBR5419/04. **SPAD- Sistema de Proteção de Estrutura Contra Descargas Atmosféricas**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT, 2001

JÚNIOR, Afonso B.A.; SILVA, Adriano de C.; REIS, Alex; CHAVES, Camilla de S.; SANTILIO, Fabricio P.; GONDIM, Isaque N.; **CURSO DE ATPDRAW**. Uberlândia, 2013.

MEISTER, André. **MODELAGEM DE VARISTORES DE ÓXIDO DE ZINCO PARA ESTUDOS DE COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO**. Brasília, 2005.

CALLISTER Jr. W.D. **Materials Science and Engineering: an Introduction**. John Wiley & Sons Inc., 4th ed., New York, 1997.

RIBEIRO, P.C.; da COSTA, E.G.; GAMA, L.; COSTA, A.C.F.M.; KIMINANI, R.H.G.A.; MARACAJÁ, G.A.; SOUZA, T.L.F. **CARACTERIZAÇÃO DE PÓS-CERÂMICOS OBTIDOS PELO METODO PECHINI E UTILIZADOS NA OBTENÇÃO DE ISTORES DE ZnO**. João Pessoa, 2003.

de OLIVEIRA, Adriano Félix. **USO DO ATPDRAW PARA ANÁLISES DOS TRANSITÓRIOS DE CHAVEAMENTO DE UM ALIMENTADOR DE 34,5 kV.** Juazeiro, 2016.

BERNARDON, M.Sc. Daniel P.; VEIGA, Francisco D.; RECH, Roberto; da LUZ, Gerente Lucas T. **Modelagem e Aplicação do Programa ATP para Estudos de Paralelismo nas Redes de Distribuição Atendidas por Subestações de Diferentes Fontes.** Belo Horizonte, 2006.

RODRIGUES, Vinicius de Paula. **AValiação da Utilização de Supressores de Surto Instalados Junto às Cargas Consumidoras Frente a Sobreensões Atmosféricas.** Minas Gerais, 2012.

BORSOI, Sad Sadrini. **Modelagem de Varistores de Óxido de Zinco para Estudos de Coordenação de Isolamento.** São Paulo, 2018.

LEITE, Carlos Moreira; LEITE, Duilio Moreira. **Proteção Contra Descargas** Oficina da Mydia Editora, 2001.

INSTITUTO Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 21 junho 2019. **Monitoramento de incidência de raios.**

VILAR, Pablo Bezerra. **Modelagem Matemática de Varistores de ZnO.** Tese de doutorado submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017.

BRITO, Valdemir da Silva. **Modelo Elétrico de Supressor de Surto de ZnO com Ampla Faixa de Operação.** Tese de Doutorado. Campina Grande, 2016.

SILVEIRA, James. **Modelagem e Análise de Varistores de Óxido Metálico de Zinco.** Tese de Doutorado. Florianópolis, 2009.

BARBOSA, F. A. T; ORLANDO, A. F. **METHODOLOGY FOR EXPERIMENTALLY DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF MEDIUM VOLTAGE ZINC OXIDE VARISTORS.** Artigo científico. Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro – PUC-Rio, 2012.

HINRICHSEN, Volker. **Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems.** 3rd Edition. Berlin and Darmstadt, September 2011.

LEITÃO, Sandra Andréa Medeiros. **ESTUDO DA POLARIZAÇÃO ELÉTRICA RESIDUAL NOS RESISTORES NÃO LINEARES À BASE DE ÓXIDO DE ZINCO.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande – PB, 1991.

NETER, J. Et Al. **Applied Linear Statistical Models.** McGraw Hill, 1996

BITTENCOURT, Marcelo Castro. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares: Métodos Paramétricos e Não-Paramétricos.** Projeto de Graduação subterido à Unb. Brasília, 2004.

CORRÊA, Marcelo Vieira. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Não-Lineares Utilizando Modelos NARMAX Racionais - Aplicação a Sistemas Reais.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2007.

DANIEL, Antônio Márcio J. Murcci. **Estudo da Difusão do Oxigênio em Cerâmicas à Base de ZnO–Bi₂O₃ por Espectrometria de Massa de Íons Secundários.** Tese de Doutorado submetida à UEMG. Minas Gerais, 2009.

ANEXOS

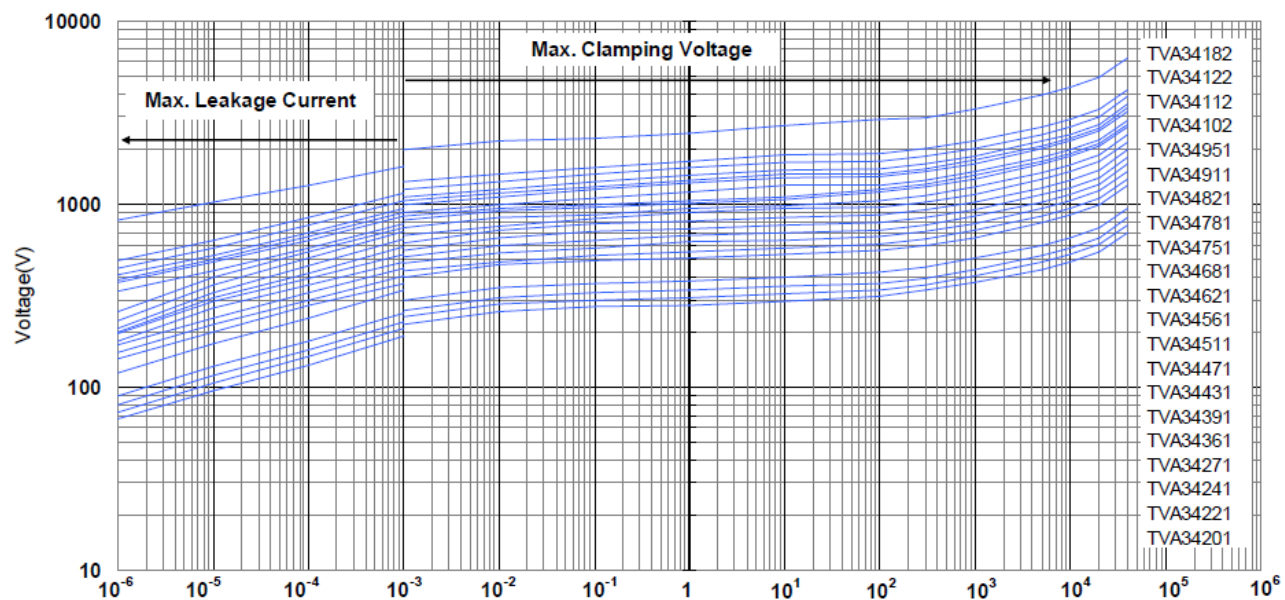
ANEXO A - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE VARISTORES TKS

TABELA DE ESPECIFICAÇÕES

Part No.	Varistor Voltage (@ 1mA DC)	Max. Operating Voltage		Max. Clamping Voltage (8/20µs)		Max. Surge Current (8/20µs)	Max. Energy (2ms)	Rated Power	Reference Capacitance @ 1KHZ
	V _{1mA} (V)	V _{AC(rms)} (V)	V _{DC} (V)	V _P (V)	I _P (A)	I _{max} (A)	W _{max} (J)	P (W)	C (pF)
TVA25201K□□□□	200	130	170	340	150	15000	128	1	2200
TVA32201K□□□□	200	130	170	340	200	25000	210	1.2	3900
TVA34201K□□□□	200	130	170	340	300	40000	310	1.4	5600
TVA34201KT□□□□	200	130	170	340	500	70000	410	1.6	14040
TVA40201K□□□□	200	130	170	340	300	40000	310	1.4	6000
TVA25221K□□□□	220	140	180	365	150	15000	135	1	2000
TVA32221K□□□□	220	140	180	365	200	25000	225	1.2	3500
TVA34221K□□□□	220	140	180	365	300	40000	340	1.4	5000
TVA34221KT□□□□	220	140	180	365	500	70000	451	1.6	12760
TVA40221K□□□□	220	140	180	365	300	40000	340	1.4	5500
TVA25241K□□□□	240	150	200	395	150	15000	146	1	1900
TVA32241K□□□□	240	150	200	395	200	25000	240	1.2	3300
TVA34241K□□□□	240	150	200	395	300	40000	360	1.4	4800
TVA34241KT□□□□	240	150	200	395	500	70000	490	1.6	11700
TVA40241K□□□□	240	150	200	395	300	40000	360	1.4	5000
TVA60241K□□□□	240	150	200	395	500	70000	490	1.6	11700
TVA25271K□□□□	270	175	225	455	150	15000	170	1	1600
TVA32271K□□□□	270	175	225	455	200	25000	250	1.2	2800
TVA34271K□□□□	270	175	225	455	300	40000	400	1.4	4100
TVA34271KT□□□□	270	175	225	455	500	70000	550	1.6	10400
TVA40271K□□□□	270	175	225	455	300	40000	400	1.4	4500
TVA60271K□□□□	270	175	225	455	500	70000	550	1.6	10400
TVA25361K□□□□	360	230	300	595	150	15000	190	1	1300
TVA32361K□□□□	360	230	300	595	200	25000	300	1.2	2200
TVA34361K□□□□	360	230	300	595	300	40000	460	1.4	3200
TVA34361KT□□□□	360	230	300	595	500	70000	730	1.6	7800
TVA40361K□□□□	360	230	300	595	300	40000	460	1.4	3500
TVA60361K□□□□	360	230	300	595	500	70000	730	1.6	7800
TVA25391K□□□□	390	250	320	650	150	15000	210	1	1100
TVA32391K□□□□	390	250	320	650	200	25000	330	1.2	2000
TVA34391K□□□□	390	250	320	650	300	40000	490	1.4	2800
TVA34391KT□□□□	390	250	320	650	500	70000	800	1.6	7200
TVA40391K□□□□	390	250	320	650	300	40000	490	1.4	3000
TVA60391K□□□□	390	250	320	650	500	70000	800	1.6	7200
TVA25431K□□□□	430	275	350	710	150	15000	220	1	1000
TVA32431K□□□□	430	275	350	710	200	25000	360	1.2	1800
TVA34431K□□□□	430	275	350	710	300	40000	550	1.4	2600
TVA34431KT□□□□	430	275	350	710	500	70000	860	1.6	6600
TVA40431K□□□□	430	275	350	710	300	40000	550	1.4	2800
TVA60431K□□□□	430	275	350	710	500	70000	860	1.6	6600

ANEXO B - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE VARISTORES TKS

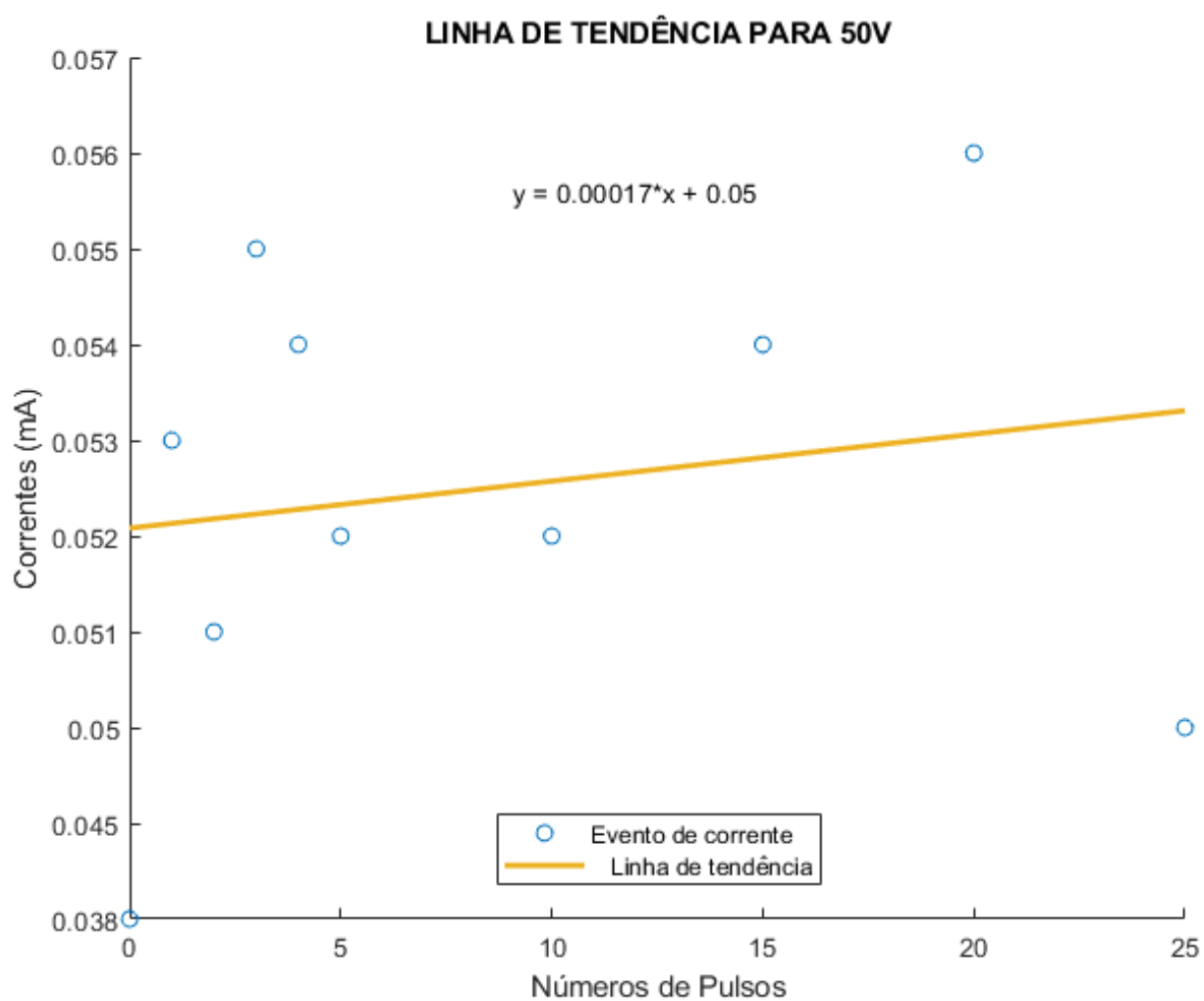
Max. Leakage Current and Max. Clamping Voltage Curves (TVA34201 to TVA34182)



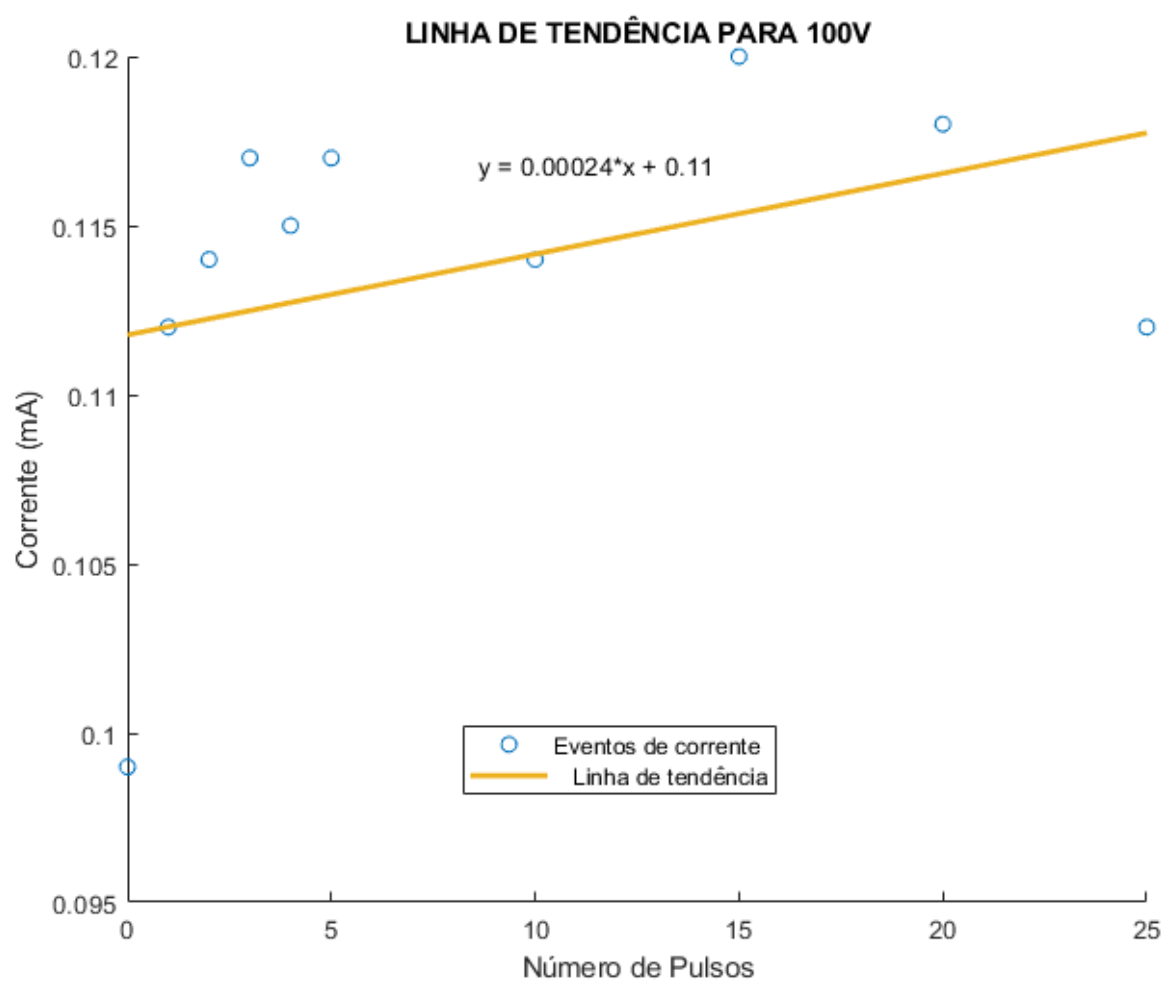
APÊNDICES

APÊNDICE A – LINHAS DE TENDÊNCIA PARA OS PONTOS DISCRETOS DE TENSÃO

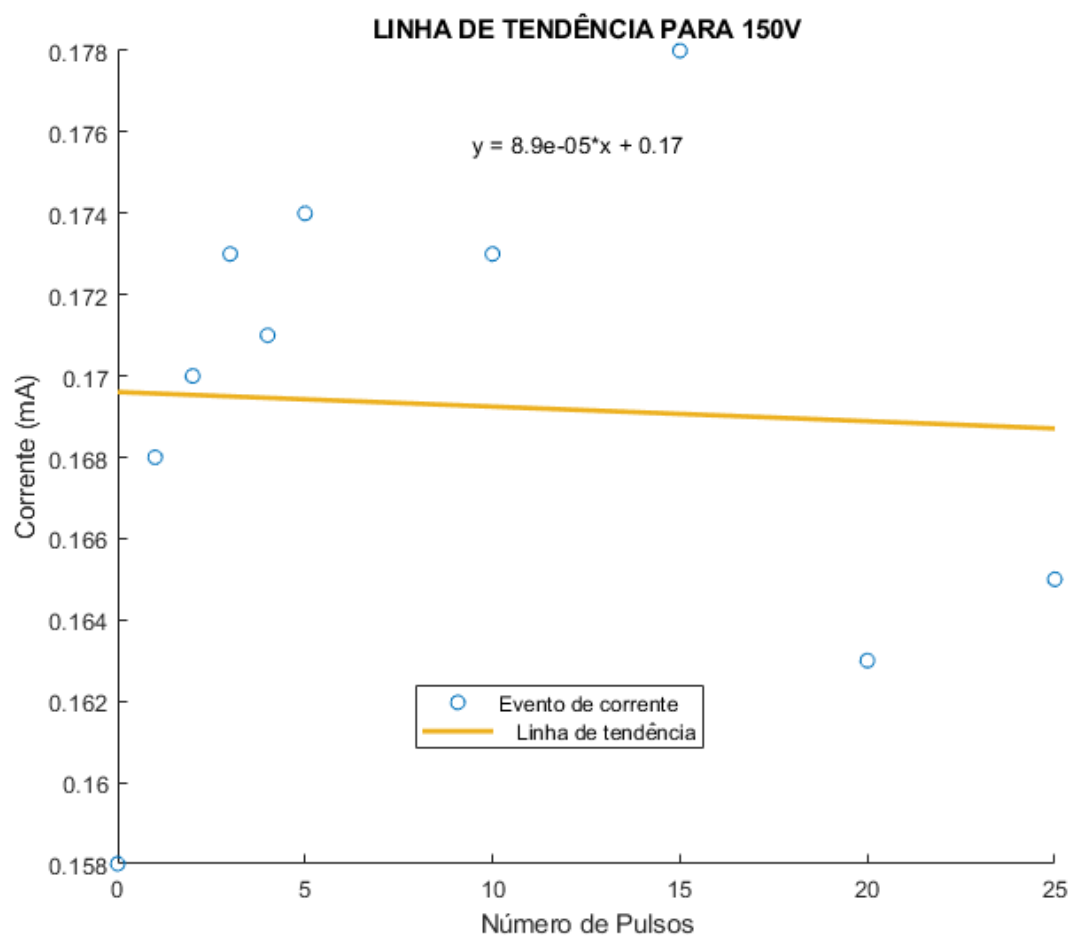
50 VOLTS



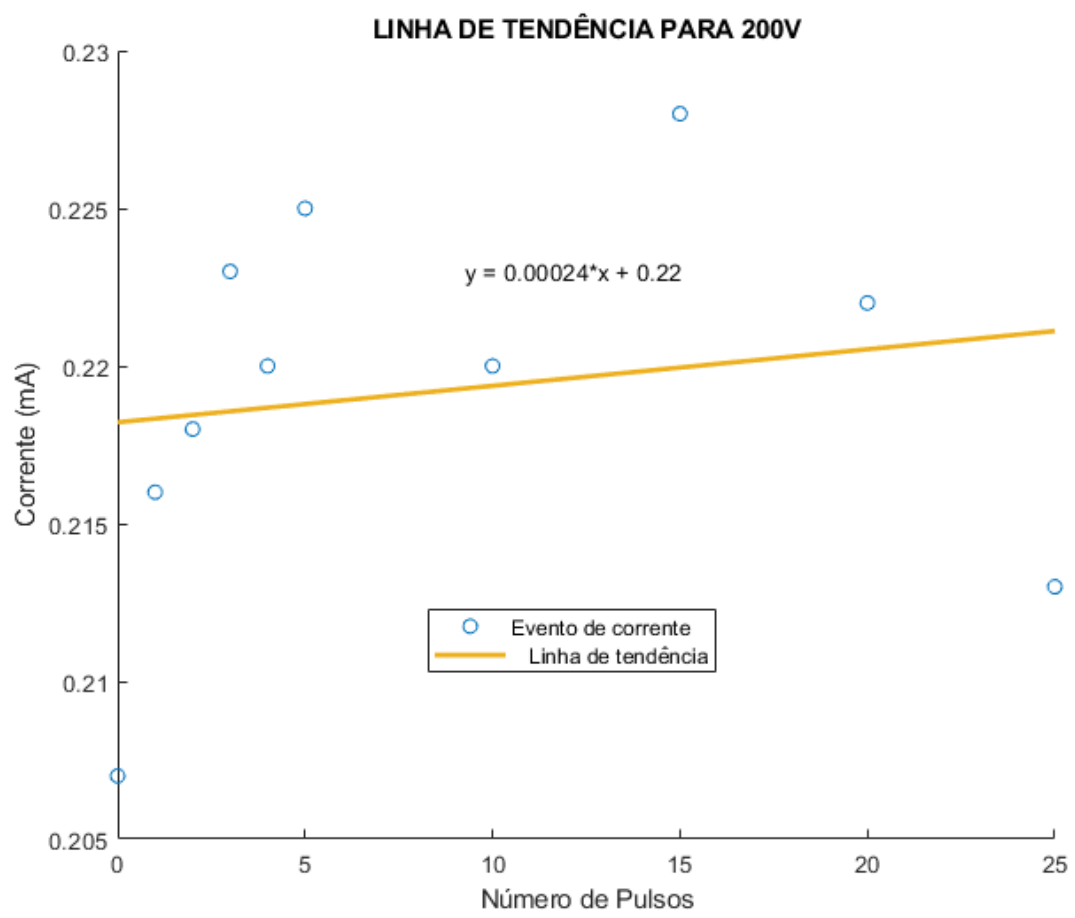
100 VOLTS



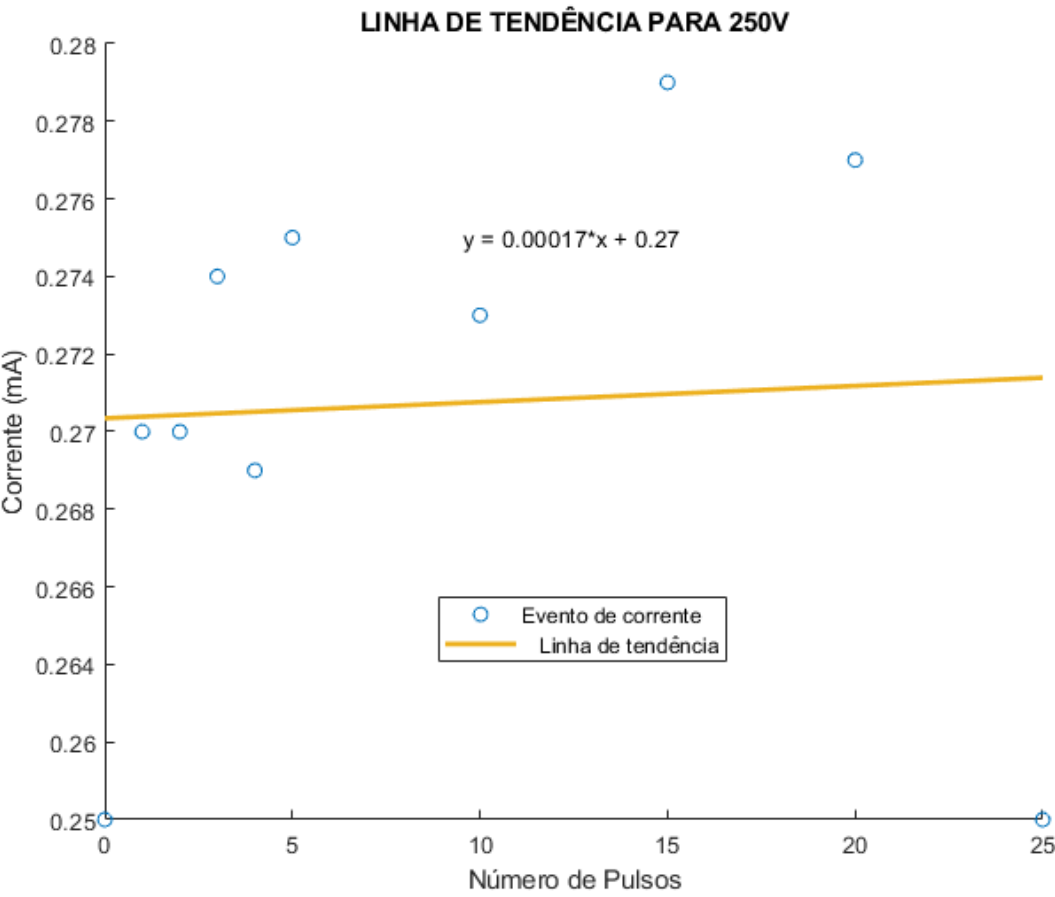
150V



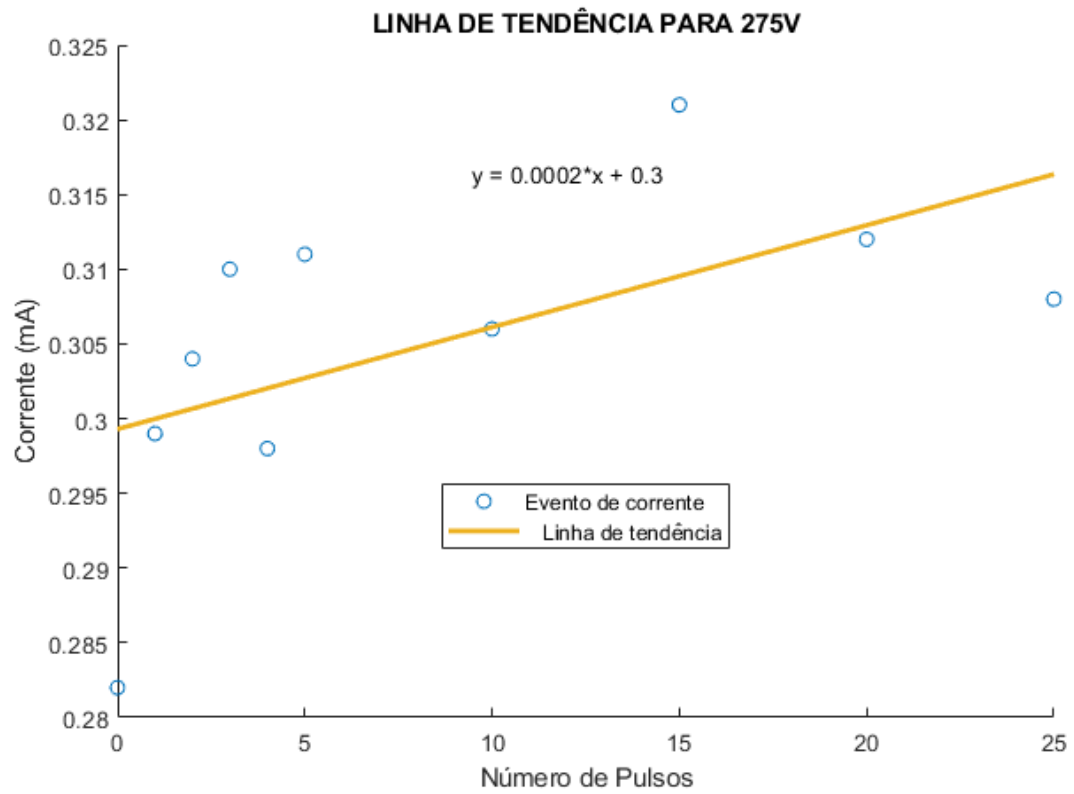
200V



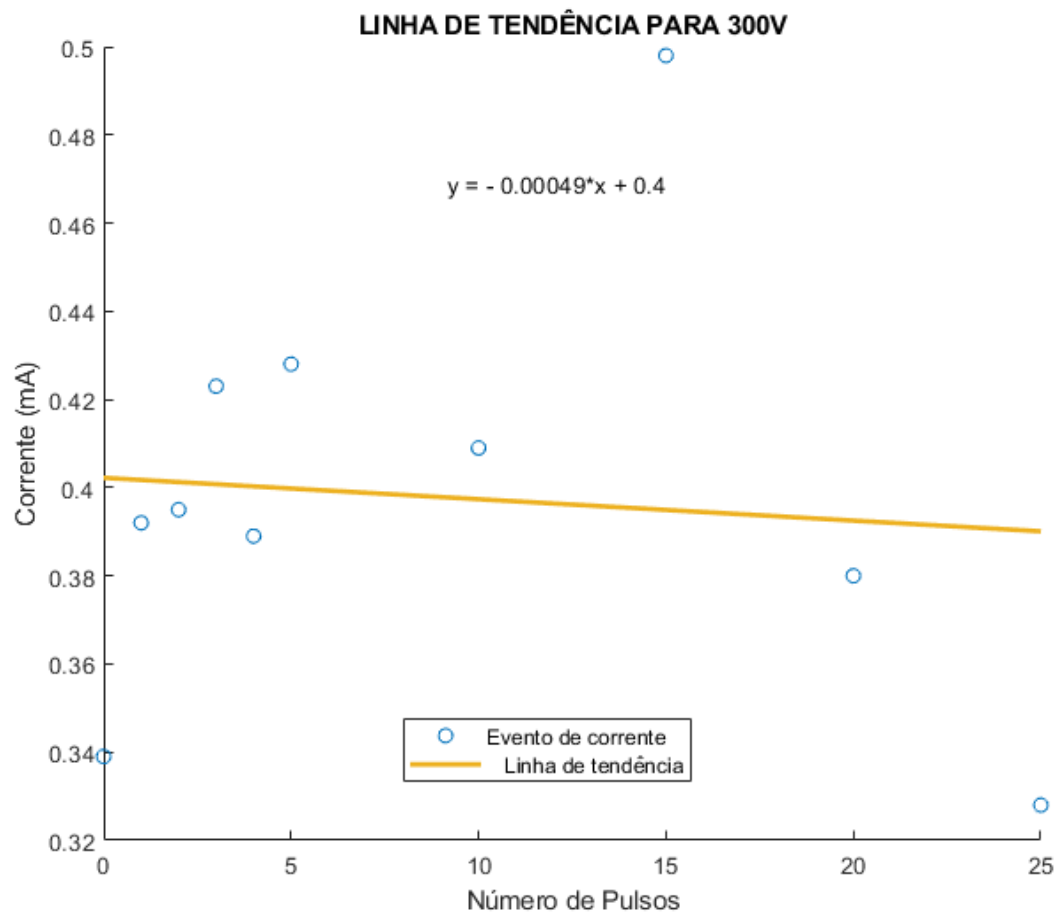
250V



275V



300V



1mA

